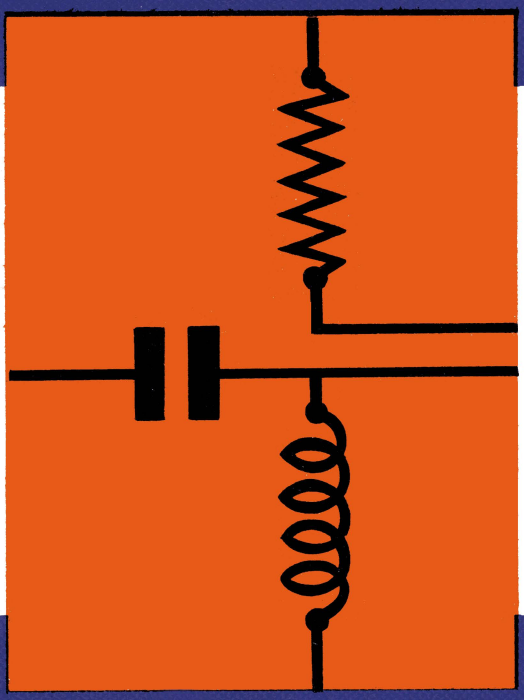
technologie des composants électroniques



résistances condensateurs bobinages

R. BESSON

ÉDITIONS RADIO

POUR RESTER « A LA PAGE » lisez

TOUTE L'ELECTRONIQUE

Revue mensuelle de technique expliquée et appliquée
Fondée en 1934
DIRECTEUR : **E. AISBERG**

★

Réputée dans le monde entier comme la principale revue technique française de radio, TOUTE L'ELECTRONIQUE tient ses lecteurs au courant de tous les progrès de l'électronique, des télécommunications et de la télévision. Rédigée par une élite de techniciens, elle s'adresse à tous les spécialistes de la radio.

Le numéro ..... **3,30 F**

TELEVISION

★

Magazine mensuel
fondé en 1939
DIRECTEUR : **E. AISBERG**

★

Théorie et pratique de la nouvelle technique de la transmission des images et ses développements les plus récents dans le monde. Réalisation des récepteurs de télévision et des appareils de mesure correspondants. Description des appareils industriels et des méthodes de leur dépannage. Tous les progrès de la télévision.

Le numéro ..... **2,10 F**

RADIO CONSTRUCTEUR

Revue mensuelle
de pratique radioélectrique
fondée en 1937
Rédacteur en chef : **W. SOROKINE**

★

C'est la revue des techniciens, dépanneurs et agents techniques. Dans chaque numéro, elle publie de nombreux montages de récepteurs, amplificateurs, appareils de mesure, émetteurs, etc., avec schémas, photographies et plans de cablage rendant leur réalisation aisée. Abondante documentation pratique et études de perfectionnement instructives.

Le numéro ..... **2,10 F**

ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE

★

Revue mensuelle
de technique moderne
destinée aux promoteurs
et aux utilisateurs des
méthodes et appareils
électroniques.

★

Toutes les applications de l'électronique à tous les domaines de l'industrie.

Le numéro ..... **4,80 F**

SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO

9, rue Jacob - PARIS (6e)

Téléphone : ODÉON 13-65 C.C.P. PARIS 1164-34

René BESSON

★

TECHNOLOGIE DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES

Résistances
Condensateurs
Bobinages

★

EDITIONS RADIO
9 rue Jacob, Paris 6e

© by Editions Radio, 1964
Tous droits de reproduction
et d'adaptation réservés pour tous pays

Imprimé en France
Imprimerie L'UNIVERSELLE
12, Place Saint-Amatre, Auxerre (Yonne)

Dépôt légal : 2e trimestre 1964
Editeur n° 372. Imprimeur n° 462

PRÉFACE

« Mais d'abord, de quoi s'agit-il ? » avait l'habitude de dire le Maréchal Foch. Cette question prend légitimement place en tête de ce livre.

Qu'est-ce, en effet, que cette technologie qui en constitue l'objet ? Et qui a besoin de l'étudier ?

On appelle « technologie » la science qui examine les matières premières, les outils et les procédés servant à créer des produits manufacturés et qui, en même temps, en passe en revue les diverses catégories, en analysant leurs propriétés caractéristiques.

De cette définition découle une conclusion logique : la connaissance de la technologie est également indispensable à ceux qui fabriquent les produits étudiés et à ceux qui les utilisent. *Dans le domaine particulier de l'Electronique, la technologie des composants ne saurait en aucune manière être ignorée de ceux qui les incorporent dans des ensembles, pas plus que ne peuvent la méconnaître ceux qui fabriquent ces composants.*

Quand un ensemble électronique présente des défauts, trois fois sur quatre ceux-ci ont pour origine un choix inadéquat de ses composants plutôt que leur mauvaise qualité intrinsèque. C'est dire combien il importe que celui qui réalise un prototype, ou celui qui détermine le choix des éléments constitutifs d'un appareil destiné à la fabrication de série, soit exactement informé des caractéristiques du matériel utilisé.

Or, avec le prodigieux développement de l'Electronique, la variété des composants produits industriellement a de quoi donner le vertige.

Comment s'y reconnaître ? Comment opérer un choix rationnel ? Comment employer au mieux les éléments choisis, en assurant leur parfaite adaptation mutuelle ?

A toutes ces questions, on trouvera la réponse dans les pages qui suivent. Elles passent en revue l'ensemble des éléments passifs *entrant dans la composition des circuits électroniques : les résistances, les condensateurs et les bobinages. Si l'on sait convenablement déterminer les caractéristiques de ces composants formant une sorte de trinité R-L-C, si on les associe d'une manière appropriée aux* éléments actifs *que sont les tubes et les semi-conducteurs, on possède la parfaite maîtrise de toute l'électronique.*

L'étude du présent ouvrage ouvre le chemin d'une pareille maîtrise. Nul n'était mieux autorisé pour le rédiger que notre excellent ami et collaborateur R. Besson dont la plume se manifestait déjà dans Toute la Radio *d'avant-guerre. Il possède, en effet, le privilège d'exercer son activité à la fois dans l'industrie et dans l'enseignement. Ayant gravi tous les échelons de la hiérarchie dans une des plus importantes entreprises du pays, il en dirige l'un des principaux départements en pleine connaissance de ses moindres rouages. Et, en même temps, son talent didactique contribue à la formation de nouvelles générations d'électroniciens.*

Dans ce livre, on trouvera donc un concentré de son expérience industrielle rendu aisément assimilable grâce à un exposé clair et méthodique, inspiré par la grande habitude de l'enseignement. Pouvait-on rêver alliance plus harmonieuse de qualités ?

E. AISBERG.

LES NORMES, LES UNITÉS ET LES SYMBOLES UTILISÉS EN ÉLECTRONIQUE

1. — LES ORGANISMES DE NORMALISATION.

Les organismes participant aux travaux de normalisation, en France, sont les suivants :

1.1. — *LA FÉDÉRATION NATIONALE DES INDUSTRIES ÉLECTRONIQUES* (F.N.I.E.).

La F.N.I.E., qui groupe tous les syndicats professionnels, a suscité la création d'un certain nombre de commissions de travail dont les membres sont des spécialistes de l'industrie connaissant parfaitement les pièces qu'il s'agit d'étudier.

Elle est consultée par tous les comités de normalisation et elle participe à leurs travaux.

Elle édite des *spécifications syndicales* et des *fascicules de documentation* se rapportant surtout au matériel « grand public ». Depuis 1962, elle procède à la *qualification des composants électroniques grand public*, c'est-à-dire qu'elle dresse la liste des composants des divers fabricants, qui satisfont aux spécifications syndicales. C'est le *Laboratoire Central des Industries Electroniques* (L.C.I.E.) qui est chargé des mesures et des essais.

1.2. — *L'UNION TECHNIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ* (U.T.E.).

L'U.T.E. est une association privée, sans but lucratif, régie par la loi de 1901. Elle groupe l'ensemble des industries électriques et électroniques et l'*Electricité de France*. Son objet principal est la normalisation de la construction, des caractéristiques et de l'installation des matériels électriques ou électroniques.

Elle s'occupe également des moyens permettant de reconnaître le matériel conforme aux normes par l'attribution de marques de qualité.

L'U.T.E. élabore les projets de norme qui sont ensuite transmis à l'*Association Française de Normalisation* (AFNOR) qui les transforme en « normes françaises homologuées ». Ces normes peuvent s'appliquer au matériel professionnel ou au matériel grand public ; elles prescrivent parfois des règles de sécurité ou des caractéristiques minimales que doivent présenter certains ensembles ou certains composants. La plupart de ces normes ont un caractère obligatoire.

L'U.T.E., par son *Comité Electrotechnique français* (C.E.F.), participe aux travaux de la *Commission Electrotechnique Internationale* (C.E.I.) dont le siège est à Genève.

Cette commission s'occupe de la politique générale, de la terminologie, des symboles, des unités à employer en électrotechnique. Elle cherche à uniformiser, sur le plan international, les méthodes de mesure pour l'attribution des différentes normes nationales. Ainsi, un composant pourra-t-il équiper des appareils destinés à être exportés, car il satisfait aux différentes normes des principaux pays.

C'est l'U.T.E. qui est chargée de diffuser en France les publications de la C.E.I.

1.3. — *LE COMITÉ DE COORDINATION DES TÉLÉCOMMUNICATIONS* (C.C.T.).

Ce Comité est un organisme d'Etat qui, en liaison avec les organismes officiels de normalisation, les utilisateurs et les constructeurs, définit la qualité, l'aptitude à l'emploi et l'interchangeabilité des composants et de certaines pièces et appareils destinés à l'Etat.

Ce comité établit des *spécifications unifiées* en conformité avec les normes françaises qu'elles complètent ou dont elles augmentent le degré de sévérité.

C'est le *Centre National d'Etudes des Télécommunications* (C.N.E.T.) qui est chargé de l'édition et de la diffusion des spécifications C.C.T.

Le C.C.T. fait procéder, par le laboratoire du L.C.I.E., aux essais permettant l'homologation des composants satisfaisant aux spécifications. La liste des homologations en vigueur est publiée une ou deux fois par an. Il ne s'agit bien entendu que de composants destinés au matériel professionnel.

1.4. — *LE LABORATOIRE CENTRAL DES INDUSTRIES ÉLECTRIQUES* (L.C.I.E.).

Le L.C.I.E. est un organisme corporatif qui exécute sur demande tous les problèmes de contrôle et de métrologie dans le domaine électrique.

Il possède un *caractère officiel ;* son Directeur doit être agréé par le Ministre de l'Industrie ; son fonctionnement est contrôlé par différentes administrations et commissions.

Il est *neutre,* car il n'est lié à aucune firme, ni à aucun organisme. Son personnel est tenu au secret professionnel le plus rigoureux.

Il effectue tous essais privés à la demande des industriels, et il délivre soit un simple compte-rendu, soit un certificat officiel. Il effectue également les essais d'homologation de contrôle à la demande des organismes habilités. Les compte-rendus d'essais sont délivrés à l'organisme demandeur qui seul prend la décision de conformité. Les différents compte-rendus ne peuvent jamais être remis à une autre personne que celle qui a demandé l'essai.

Le L.C.I.E. procède à tous les étalonnages à partir des étalons nationaux, de l'ohm et du volt dont il a la garde.

1.5. — *LES ORGANISMES ÉTRANGERS.*

Les organismes étrangers les plus importants en ce qui concerne les composants électroniques sont :

— Le *National Bureau of Standards* (N.B.S.), qui édite les normes destinées au matériel militaire des U.S.A. (M.I.L.) ;

— L'*Association des Ingénieurs Electriciens Allemands,* qui édite les spécifications V.D.E. (Cette association est à l'Allemagne ce que l'U.T.E. est à la France). Ces spécifications peuvent donner lieu, ensuite, à l'établissement de normes D.I.N.

⁂

C'est en particulier grâce aux efforts de ces organismes officiels que l'industrie des composants en France a pris la place que l'on sait. Les différentes pièces détachées peuvent être classées selon les normes ou les spécifications garanties par le fabricant. Ainsi, l'utilisateur est-il certain des caractéristiques de la pièce et peut-il la monter en toute connaissance de cause.

Il en est résulté que la fiabilité des matériels a progressé très rapidement, assurant à nos industries une position en flèche sur le marché mondial.

Dans cet ouvrage, il sera indiqué, pour chaque composant, la liste des normes ou spécifications qui s'y rapportent, ainsi qu'un bref résumé de leurs principales dispositions.

2. — LES UNITÉS.

2.1. — Le système international.

Le seul système de mesures légal en France est le système métrique décimal à six unités de base appelé, par la Conférence Générale des Poids et Mesures, le Système International S.I.

Il fait l'objet du décret n° 61-501 du 3 mai 1961 publié au *Journal Officiel* du 20 mai 1961.

Il est directement dérivé du système MKSA rationalisé (ou système Giorgi).

Les unités de base sont : le mètre, le kilogramme-masse, la seconde, l'ampère, le degré kelvin et la candela. Les unités secondaires sont en relation directe avec les unités de base.

Les unités électriques nous intéressent particulièrement :

A partir de l'*ampère*, intensité de courant dans un circuit, on définit l'unité de tension : le *volt ;* l'unité de résistance : l'*ohm ;* et l'unité de quantité d'électricité : le *coulomb.*

La loi de l'induction $E = \frac{-d\Phi}{dt}$ définit le flux d'induction magnétique. Le *weber* (Wb) est le flux d'induction magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produit une force électromotrice de 1 volt, si on l'amène à zéro en 1 seconde par décroissance uniforme.

L'unité d'énergie, le *joule,* apparaît comme le produit soit du volt par le coulomb (électrostatique), soit de l'ampère par le weber (électrodynamique).

Le *henry* est l'inductance électrique d'un circuit fermé dans lequel une force électromotrice de 1 volt est produite lorsque le courant qui parcourt le circuit varie uniformément de 1 ampère par seconde.

La relation $Q = C.E$ définit la capacité. Le *farad* est la capacité d'un condensateur électrique entre les armatures duquel apparaît une différence de potentiel de 1 volt, lorsqu'il est chargé d'une quantité d'électricité de 1 coulomb.

La densité de flux magnétique ou induction magnétique est donnée par la relation $B = \frac{d\Phi}{dt}$.

Le *tesla* (T) ou *weber par mètre carré* (Wb/m^2) est l'induction magnétique uniforme qui, répartie sur une surface de 1 mètre carré, produit un flux magnétique total de 1 weber.

L'unité de champ magnétique est l'*ampèretour par mètre* (At/m). L'*ampère-tour* (At) est la force magnétomotrice correspondant à un courant de 1 ampère parcourant un circuit d'une seule spire.

Entre l'induction magnétique et le champ magnétique il existe la relation : $B = \mu H$, dans laquelle μ est la perméabilité qui est égale au henry par mètre.

Le tableau de la page suivante donne la liste des principales unités et grandeurs ; il a été établi par *La Radiotechnique.* Les unités en caractère gras sont celles qui figurent dans le décret de 1961. Les autres sont des unités dérivées ou tolérées à titre transitoire. Par exemple : le gauss et le maxwell sont des unités qui ont été remplacées respectivement par le tesla et le weber ; elles ne doivent donc pas être utilisées dans l'enseignement et dans les actes officiels.

Comme le public n'est pas encore familiarisé avec les nouvelles unités, et que les livres techniques et les brochures des fabricants ont conservé jusqu'à maintenant les anciennes, il a paru nécessaire de faire figurer les unes et les autres sur le tableau.

Nous espérons que ce résumé permettra la remise à jour des connaissances de nos lecteurs au sujet des unités.

PRINCIPALES UNITÉS ET GRANDEURS

	GRANDEUR		UNITÉ			Correspondance Observations
	Nom	Symbole	Nom	Symbole	Valeur	
Espace	longueur	l	**mètre**	m		
			micron	μ	10^{-6} m	1 angstrom (Å) = 10^{-10}m
Temps	angle	Ω	**stéradian**	sr		
	temps	t	**seconde**	s		
	fréquence	f	**hertz**	Hz		le cycle par seconde est toléré
Mécanique	vitesse	v	**mètre par seconde**	m/s		
	force, poids	F P ou G	**newton**	N		le kilogramme force ou poids) est prohibé : 1 kgf (ou p) = 9,8 N
			dyne	dyn	10^{-5} N	
			sthène	sn	10^{3} N	
	énergie, travail	W	**joule**	J	1 Nm	le kilogrammètre est prohibé
			erg		10^{-7} J	1 kgm = 9,8 J
			watt-heure	Wh	3 600 J	
			électron-volt	eV	$1{,}59 \times 10^{-19}$ J	
	puissance	p	**watt**	W	1 Nm/s	le cheval vapeur est prohibé, 1 ch = 736 W
	moment, couple	M	**mètre-newton**	mΛN		
Electricité	Intensité	I	**ampère**	A		
	Tension, Force électromotrice	U, E	**volt**	V		
	Résistance, Réactance, Impédance	R, X, Z	**ohm**	Ω	1 V/A	
	Résistivité	ϱ	**ohm-mètre**	Ω.m	1 Vm/A	
	Quantité d'électricité	Q	**coulomb**	C	1 As	
			ampère-heure	Ah	3 600 C	
	Energie	W	**joule**	J	1 VAs	
	Puissance	P	**watt**	W		
	— (apparente)		**volt-ampère**	VA		
	— (réactive)		var	var		
	Champ électrique	E	**volt par mètre**	V/m		
	Capacité	C	**farad**	F	1 As/V	
	Constante diélectrique ou permittivité	ε	**farad par mètre**			
	Inductance, — mutuelle	L, M	**henry**	H	1 Vs/A	
	Flux d'induction magnétique	∅	**weber**	Wb	1 Vs	
			maxwell	M	10^{-8} Wb	
	Champ magnétique	H	**ampère par mètre**	A/m		4 π 10^{-3} œrsted qui est prohibé
	Intensité magnétique	B	**tesla**	T	1 Vs/m²	
			gauss	G	10^{-4} T	
	Perméabilité	μ	**henry par mètre**	H/m		
	Force magnétomotrice	F	**ampère**	A		
Chaleur	Température	θ,T	**degré kelvin**	° K		
		θ,t	**degré celsius**	° C		
	Quantité chaleur	Q	**joule**	J		
			calorie	cal	4,1855 J	
Transmission			**neper**	Np	8,69 dB	
			decibel	dB	0,115 Np	

2.2. — Multiples et sous-multiples.

Les multiples et sous-multiples décimaux officiels sont portés sur le tableau ci-dessous :

Facteur par lequel est multiplié l'unité	Préfixe à placer devant le nom de l'unité	Symbole à placer avant celui de l'unité
10^{12}	téra	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	méga	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	h
10^{1}	déca	da
10^{-1}	déci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p

3. — PRINCIPES DE L'ECRITURE DES NOMBRES, DES UNITÉS ET DES GRANDEURS.

3.1. — Ecriture des nombres.

On ne doit utiliser ni le point, ni la virgule pour marquer la séparation en tranches d'un nombre comportant un assez grand nombre de chiffres. Cette séparation doit être marquée par un espace de largeur égale à celle d'un chiffre courant.

On sépare ainsi le nombre en tranches de trois chiffres à partir de la virgule, tant pour la partie entière que pour la partie décimale.

L'emploi d'un point à la place d'une virgule pour séparer la partie entière de la partie décimale est interdit. Il y a lieu de veiller particulièrement à cette prescription lors de la traduction de documents en provenance des U.S.A.

3.2. — Formation des symboles d'unités.

Les symboles normalisés des unités, ainsi que ceux des préfixes associés, sont invariables. En particulier, la substitution d'une majuscule à une minuscule ou l'inverse, celle d'une lettre latine à une lettre grecque ou l'inverse, sont interdites.

Par exemple :

écrire kg et non Kg, ou K°, ou kilog ; écrire μF et non mf, ou MF (dans ce dernier cas, on commet une erreur de 10^{12}).

Contrairement à ce qui se fait pour les abréviations de mots, les symboles des unités s'écrivent sans point final et ne doivent pas comporter la marque du pluriel, notamment la lettre « s » qui, par ailleurs, représente la seconde. De même, quand ils sont employés dans l'écriture d'un symbole composé, les noms des unités pour lesquels il n'est pas prévu de symbole ne prennent pas la marque du pluriel.

Par exemple :

écrire : 28,5 mm et non 28,5 mm. ni 28,5 mms ; écrire : 100 dyne/cm^2 et non 100 dynes/cm^2.

Au cas où l'emploi des symboles normalisés se révèle incommode, notamment si on désire faciliter la compréhension par des lecteurs peu familiarisés avec les normes, il ne faut en aucun cas substituer à ces symboles des abréviations. On doit soit rappeler la signification des symboles, soit écrire en entier les noms des unités.

Par exemple :

écrire : seconde ou s et non sec.

Lorsqu'une grandeur est le produit de plusieurs autres, le symbole de l'unité de cette grandeur est figuré par le produit des unités composantes, indiqué par un point. Conformément à la règle générale, on peut supprimer ce signe en accolant les symboles successifs, lorsqu'aucune confusion ne peut en résulter. Par exemple : kVA, Ah, kWh.

Lorsqu'une grandeur est le quotient de deux autres, le symbole de l'unité de cette grandeur est figuré par le quotient des symboles des unités correspondantes, indiqué par un des signes de la division. On peut encore faire usage des exposants négatifs, les signes de la division étant alors remplacés par ceux de la multiplication.

Par exemple : l'unité de vitesse étant le quotient de l'unité de longueur par l'unité de temps, écrire :

$$\text{km/h ou } \frac{\text{km}}{\text{h}} \text{ ou } \text{km.h}^{-1}$$

La suppression du signe de la division, ou son remplacement par un point sont absolument interdits, de même que le signe de la division par un tiret. Par exemple : unité de vitesse, on ne doit pas écrire : km.h, ni kmh, ni km - h.

3.3. — Formation des noms d'unité.

Lorsqu'une grandeur est le produit de plusieurs autres, on forme le nom de l'unité de cette grandeur en réunissant par un trait d'union les noms des unités correspondantes.

La barre oblique étant le signe de la division ne doit pas être substituée au trait d'union.

Dans le cas des unités les plus courantes, le trait d'union est supprimé et les deux noms sont soudés, mais seulement s'il s'agit du produit de deux unités. Par exemple : mètre-newton, au pluriel : mètres-newtons ; ou watt-heure, au pluriel : wattheures.

Lorsqu'une grandeur est le quotient de deux autres on forme le nom de l'unité de cette grandeur en intercalant le mot « par » entre le nom de l'unité du dividende et celui du diviseur. En aucun cas, on doit omettre le mot « par »

ni le remplacer par un trait d'union. Par exemple : vitesse : kilomètre par heure et non pas : kilomètre-heure, ni kilomètre/heure qui est réservé aux symboles.

3.4. — Majuscules.

Les noms des unités s'écrivent toujours en minuscules, même lorsqu'on a donné à l'unité le nom d'une personne.

Contrairement aux symboles, les noms des unités prennent la marque du pluriel. Par exemple : un ampère, des ampères.

Les symboles des unités comportent une majuscule lorsqu'on a donné à l'unité le nom d'une personne. Par exemple : ampère : A ; joule : J ; coulomb : C.

3.5. — Ecriture des grandeurs.

L'expression d'une grandeur spécifiée comporte l'indication de la valeur numérique rapportée à une unité déterminée et l'indication de cette unité. En aucun cas, le nom de l'unité composée ne peut être mutilé et réduit à celui d'une unité différente. Par exemple : 30 kilomètres par heure est l'expression d'une vitesse ; 30 kilomètres ne peut être que l'expression d'une longueur.

Dans le cours d'un texte, on ne doit pas représenter les unités par leurs symboles, sauf s'ils sont précédés de chiffres. Par exemple : écrire quarante kilomètres ou 40 kilomètres, ou 40 km mais non quarante km ; ou le km vaut 1 000 m.

Lorsqu'on utilise une unité à division décimale qui possède un symbole littéral, ce symbole doit être placé immédiatement à droite du nombre complet, sur la même ligne et en caractères de même corps.

Lorsque l'unité a pour symbole un signe conventionnel (degré d'angle, minute ou seconde d'angle), il doit être placé soit au-dessus de la virgule, soit immédiatement à droite du nombre complet.

S'il s'agit d'un symbole mixte comportant un signe et une lettre (degré kelvin, degré celsius), il faut le reporter à la droite du nombre complet. Par exemple : 28,5 mm et non 28 mm,5 ; 18,4° ou 18°,4 ; 25,4°C et non 25°,4 C ou 25°C,4.

4. — SYMBOLES GRAPHIQUES CONCERNANT LES TÉLÉCOMMUNICATIONS.

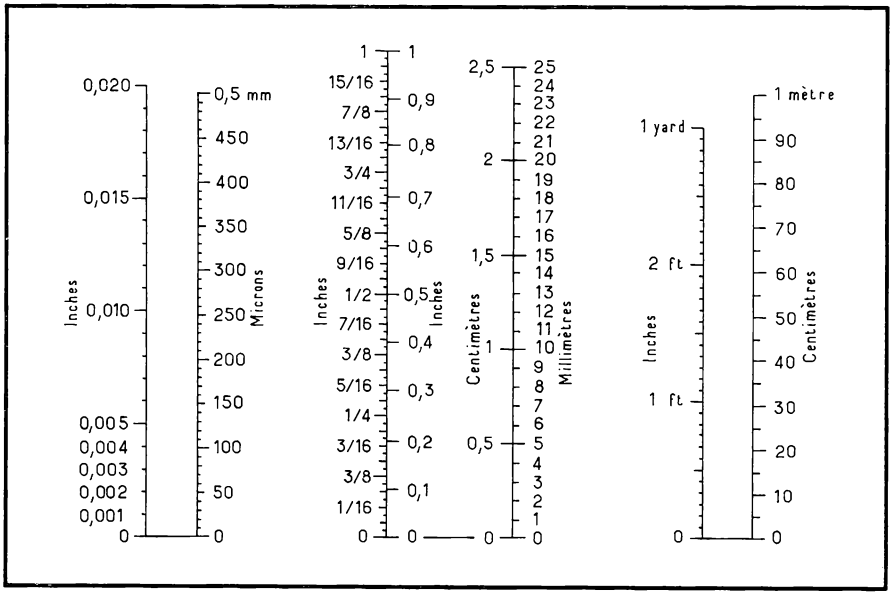
Ces symboles graphiques font l'objet de la norme française NF.C. 03.390 (1950). C'est un document de 16 pages, très complet, comprenant quatre groupes qui sont : les symboles concernant l'ensemble des télécommunications, la téléphonie, la télégraphie et les radiocommunications. Certains de ces groupes se subdivisent en trois sections à savoir : les symboles pour schémas détaillés, pour schémas d'ensemble et les symboles pour plans de situation et cartes d'exploitation.

Ce document a besoin d'être refondu et complété. Du reste, il n'a jamais été intégralement respecté. Chaque grande maison, chaque éditeur s'est constitué son standard personnel en partant de la norme officielle .

Nous adopterons, dans cet ouvrage, les symboles graphiques de la *Société des Editions Radio*, dont nos lecteurs ont bien l'habitude.

5. — TABLES DE CONVERSION ENTRE LES UNITÉS MÉTRIQUES ET LES UNITÉS ANGLO-SAXONNES.

Nous avons pensé rendre service à nos lecteurs en reproduisant ci-dessous des abaques très simples permettant d'avoir une bonne appréciation de conversion. De tels abaques sont très utiles lors de la lecture de revues anglo-saxonnes.



LES RÉSISTANCES FIXES

1. — GÉNÉRALITÉS.

1.1. — Les définitions.

1.1.1. — *LA RÉSISTIVITÉ.*

Les électrons libres existent dans tous les corps. Cependant leur nombre et leur facilité de déplacement sont extrêmement variables d'un corps à l'autre, selon leur architecture atomique et moléculaire.

Lorsqu'il ne peut y avoir que très peu d'électrons libres, on dit que le corps est isolant ; lorsqu'il peut y en avoir beaucoup, c'est un conducteur. L'unité qui mesure cette propriété des corps est la *résistivité* (ρ). Elle s'exprime en ohm.mètre, c'est l'unité légale. En pratique, pour les conducteurs on utilise souvent le $\mu\,\Omega$.cm.

Les conducteurs ont une résistivité de l'ordre de quelques $\mu\,\Omega$.cm, les isolants atteignent 10^{18} Ω.cm ; les semiconducteurs se situent entre les conducteurs et les isolants, avec une résistivité de l'ordre de l'ohm.cm.

Le meilleur conducteur est l'argent ($\rho = 1{,}46\,\mu\,\Omega$.cm), puis viennent le cuivre et l'aluminium. Les alliages résistants utilisés pour les résistances bobinées ont une résistivité de l'ordre de $100\,\mu\,\Omega$.cm.

Les meilleurs isolants sont : la bakélite, le mica, les céramiques, le quartz, les plastiques spécialisés, etc...

La résistivité est variable en fonction de la température. Certains corps ont un coefficient de température positif, c'est-à-dire que la résistivité augmente avec la température ; c'est le cas de la plupart des conducteurs. D'autres ont un coefficient de température négatif, pour lesquels la résistivité diminue lorsque la température augmente ; c'est le cas d'un grand nombre de semiconducteurs, d'isolants et de quelques alliages.

La résistivité à la température t par rapport à 0°C est :

$$\rho t = \rho 0 (1 + \alpha t)$$

α est le coefficient de température positif ou négatif selon les cas.

1.1.2. — *LA RÉSISTANCE.*

La résistance d'un corps dépend de sa résistivité, donc de sa nature, mais aussi de ses dimensions. Plus sa longueur est grande, plus les électrons ont de chemin à parcourir et plus ils ont à vaincre les obstacles de la résistivité. Plus sa section est faible et plus la densité des électrons est élevée augmentant les difficultés.

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

R en Ω (unités légales).
l en m.
s en m^2.
ρ en Ω.m.

Tout corps possède donc une résistance, si petite ou si grande soit-elle, puisqu'il a des dimensions et est constitué par une matière ayant une résistivité.

Les électrons libres possèdent une charge négative élémentaire. Si leur trajectoire est orientée par une source extérieure, c'est une certaine quantité d'électricité qui va parcourir le conducteur. Elle est fonction de la différence de potentiel entre les bornes du conducteur et de sa résistance (*loi d'ohm*).

$$I = \frac{E}{R} \qquad \text{ou } E = R\,I \qquad \text{ou } R = \frac{E}{I}$$

R en ohms, I en ampères, E en volts.

1.1.3. — *L'ÉCHAUFFEMENT DES RÉSISTANCES.*

Les chocs des électrons entre eux dans le conducteur libèrent une énergie ($1/2\ m\ v^2$) qui, transformée en chaleur, l'échauffe. Cette transformation n'est pas réversible ; elle est analogue à un frottement mécanique. La puissance dissipée en chaleur est :

$$P = R\,I^2 \qquad \text{ou} \qquad P = \frac{E^2}{R} \quad \text{ou } P = E\,I$$

P en watts, R en ohms, I en ampères, E en volts.

Tout conducteur parcouru par un courant s'échauffe. Ce phénomène est particulièrement important pour les résistances qui doivent parfois dissiper une puissance élevée sous un faible volume.

La température superficielle d'une résistance est la somme de l'échauffement et de la température ambiante maximale. Elle ne doit pas dépasser la valeur indiquée par le constructeur.

La température ambiante à prendre en considération n'est pas celle de la pièce, mais celle du lieu de fonctionnement à l'intérieur du châssis. Elle dépend des éléments voisins qui radient de la chaleur.

On doit également tenir compte des possibilités de refroidissement de la résistance. Il ne faut jamais la surcharger car sa stabilité et sa durée de fonctionnement seraient profondément altérées.

La température de l'ambiance est donc à mesurer sur une maquette définitive, afin de bien contrôler tous les paramètres.

Les petites résistances (jusqu'à 2 W) sont fixées par leurs fils de sortie qui doivent être de fort diamètre, et courts. Ils sont soudés sur des masses métalliques appréciables.

Les résistances de puissance sont fixées par des bagues ou par des colliers reliés à des masses métalliques importantes. Leur dilatation est appréciable, aussi leur fixation ne doit pas être trop rigide, afin de ne pas produire des tensions mécaniques internes dangereuses. Elles sont placées verticalement, pour bénéficier d'un meilleur refroidissement par convection de l'air autour et dans le tube de la résistance.

Les matériaux utilisés pour fixer et isoler les résistances doivent supporter les températures élevées généralement atteintes en service normal.

1.1.4. — *LES RÉSISTANCES EN CONTINU ET EN ALTERNATIF.*

En courant continu, les résistances suivent la loi d'ohm et n'appellent pas de commentaire particulier.

Si on savait fabriquer des résistances pures, il en serait de même en alternatif ; mais il n'existe pas de technologie le permettant. Toutes les résistances répondent au schéma de la figure 2 - 1. Selon les modèles et la valeur ohmique

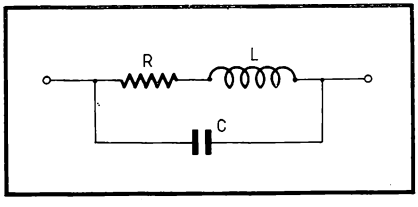


Fig. 2 - 1. — Représentation schématique d'une résistance réelle.

de l'échantillon, le coefficient de self-induction en série et la capacité en parallèle sont plus ou moins importants, et se comportent donc différemment en alternatif. Les éléments L et C provoquent des déphasages et déterminent une fréquence de résonance plus ou moins accentuée. Comme ils sont généralement de faible valeur, ces résonances se produisent pour des fréquences très élevées. L'impédance à ces fréquences peut être très différente de la résistance nominale.

En général, les résistances de *faibles valeurs* (inférieures à 30 Ω) sont toujours *inductives* et devraient être montées en série dans le circuit en évitant toute inductance parasite.

Les résistances de *fortes valeurs* (supérieures à 3 000 Ω) sont toujours *capacitives* et devraient être montées en parallèle dans le circuit en évitant toute capacité parasite.

Les résistances *moyennes* (entre 30 Ω et 3 000 Ω) ont leur terme réactif qui s'annule pour une certaine fréquence. Elles sont difficiles à monter car on doit éviter aussi bien la capacité que le coefficient de self-induction parasites.

Les résistances qui se comportent le mieux en H.F. sont celles à couche métallique et de fortes valeurs. En prenant des précautions de montage on peut obtenir un fonctionnement satisfaisant jusqu'à 100 MHz. Ensuite, viennent les résistances à couche de carbone (10 MHz), les résistances bobinées dites « non inductives » (10 MHz), les résistances agglomérées et les résistances bobinées ordinaires (1 MHz).

Les fréquences mentionnées sont des ordres de grandeur et dépendent du modèle, de sa valeur ohmique, de son montage sur le châssis et du type de circuit. Il faut une longue expérimentation sur un appareil définitif avant de pouvoir avancer des chiffres précis sur ce cas particulier.

1.1.5. — *LA FIABILITÉ.*

C'est un terme moderne qui signifie « plus que la qualité ».

La *qualité* est une assurance donnée à l'utilisateur que le produit a été fabriqué dans toutes les règles de l'art et que ses caractéristiques sont bien conformes aux normes et aux valeurs publiées.

La *fiabilité*, c'est la confiance que l'on peut avoir dans cet élément placé dans un circuit déterminé pour un fonctionnement parfait pendant un certain temps. La fiabilité est relative. Une résistance placée dans un circuit bien déterminé peut être fiable pour 10 000 heures. Tandis que la même pièce placée dans un autre circuit ne l'est pas, car elle est surchargée ou mal utilisée.

On tient compte de tous les paramètres dans la définition de la fiabilité : valeur nominale, tolérances extrêmes, puissance dissipée maximale, fréquence du circuit, mode de montage dans le châssis, climat dans lequel l'appareil doit fonctionner, durée de fonctionnement journalier, conditions de transport (chocs et vibrations), etc...

Les essais permettent de prévoir le risque de pannes au bout d'un certain temps. On dit que, dans ces conditions de fonctionnement, telle résistance est fiable à 99 % pour 100 000 heures. C'est-à-dire que le risque de panne provoqué par cette résistance pendant 100 000 heures de marche de l'appareil est de 1 %.

1.1.6. — *LES CARACTÉRISTIQUES PUBLIÉES PAR LES CONSTRUCTEURS.*

RÉSISTANCE NOMINALE. — C'est la valeur portée sur le corps de la résistance.

TOLÉRANCE. — C'est un pourcentage, en plus et en moins autour de la valeur nominale, que le fournisseur s'engage à respecter pour toutes les pièces livrées. Elle s'entend pour des pièces neuves avant usage, car par la suite les variations peuvent être plus importantes après un fonctionnement prolongé.

En fabrication de série, toutes les résistances livrées doivent pouvoir être montées et donner un fonctionnement correct de l'appareil ; la maquette doit être établie dans ce sens.

COEFFICIENT DE TENSION. — C'est la mesure de la variation de la valeur ohmique de la résistance en fonction de la tension à ses bornes. Elle s'exprime en pourcentage de variation par volt. Le coefficient de tension est négligeable pour les résistances bobinées et les résistances à couche de métal. Il est appréciable pour les résistances agglomérées (0,02 %/V).

PUISSANCE NOMINALE. — C'est la puissance que peut dissiper la résistance en air calme à la pression atmosphérique normale et pour une température ambiante généralement de 20 ou de 25°C. Elle est déterminée afin que dans ces conditions aucun point de la résistance ne dépasse la température fixée pour ce type de fabrication.

Si la température ambiante est plus élevée, il faut diminuer la puissance admissible, afin de rester dans les limites de température de la résistance. Des courbes de réduction sont établies pour chacun des modèles.

TENSION MAXIMALE AUX BORNES. — La tension aux bornes d'une résistance est donnée par la formule :

$$E = \sqrt{P R}$$

E en volts, P en watts (c'est la puissance nominale de la résistance), R en ohms.

Sans surcharger la résistance en puissance, on obtient des tensions très élevées aux bornes, pour les fortes valeurs ohmiques. Or, par suite de la rigidité diélectrique des matières utilisées, on ne doit pas dépasser une tension, généralement plus faible, fixée par les normes. C'est donc la tension aux bornes qui limite à ce moment la puissance admissible.

RÉSISTANCE CRITIQUE (R_c). — C'est la valeur de résistance qui, utilisée à sa puissance nominale, provoque une chute de tension égale à la tension maximale aux bornes admise pour ce modèle :

$$R_c = \frac{E^2}{P}$$

E tension nominale aux bornes et P puissance nominale.

Les résistances de valeur ohmique au-dessous de la résistance critique sont limitées par leur puissance nominale. Celles au-dessus de la résistance critique sont limitées par la tension maximale aux bornes et ne peuvent pas être utilisées à leur puissance nominale (fig. 2 - 2).

La tension maximale admise dépend des dimensions, donc de la puissance nominale et du mode de fabrication. Pour les modèles courants, elle est comprise entre 250 et 750 V. Il existe des modèles spéciaux pour les tensions élevées.

STABILITÉ. — On dit qu'une résistance est stable, lorsqu'après un long usage, sa valeur reste proche de celle qu'elle avait à l'origine. Cette variation de valeur dépend du type et de la technologie de fabrication. Les résistances bobinées ou à film métallique sont très stables, les résistances agglomérées le sont moins.

TENSION DE BRUIT. — Toutes les résistances produisent aux bornes une tension parasite produite par l'agitation thermique des molécules. Cette tension est très faible pour les résistances bobinées et à film métallique, elle est plus importante pour les résistances agglomérées, car il s'y ajoute une tension de bruit provoquée par le passage du courant dans une matière hétérogène.

Elle se mesure en microvolts par volts appliqués aux bornes (μ V/V). Elle limite la possibilité d'amplification des appareils, car à un certain niveau, elle devient gênante.

1.2. — Les différents types de résistance.

1.2.1. — *LES RÉSISTANCES BOBINÉES DE PUISSANCE.*

Elles dissipent une puissance élevée et sont utilisées dans tous les circuits de puissance. Elles ont une bonne stabilité, un coefficient de température moyen, un coefficient de tension et une tension de bruit négligeables. Elles ne peuvent pas être employées en haute fréquence à cause de leur coefficient de self-induction élevé. Bien utilisées, elles présentent une bonne fiabilité.

1.2.2. — *LES RÉSISTANCES BOBINÉES DE PRÉCISION.*

Elles présentent un volume plus important à puissance égale que les résistances bobinées normales. Elles offrent une très haute stabilité, un coefficient de tension et une tension de bruit négligeables. Les modèles normaux ne peuvent être employés en H.F. ; les modèles « anti-inductifs » se comportent mieux. Leur fiabilité est très bonne.

Elles sont utilisées comme étalon dans les circuits nécessitant une grande précision.

1.2.3. — *LES RÉSISTANCES A COUCHE.*

Elles peuvent être soit au carbone, soit à film métallique.

Elles ont une bonne stabilité, un coefficient de température et un coefficient de tension très bas. Les résistances à film métallique sont les meilleures du point de vue H.F. et elles sont en plein développement.

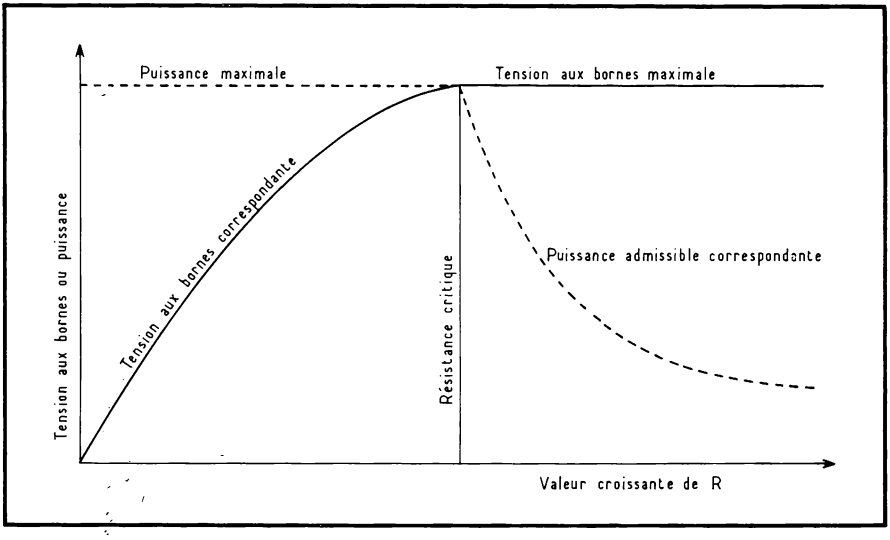


Fig. 2 - 2. — Limitation d'utilisation des résistances en fonction de la puissance et de la tension aux bornes.

Leur fiabilité peut être remarquable. Cependant, elles nécessitent des précautions d'emploi, car, aux valeurs élevées, leur couche est très mince et elles peuvent être endommagées par une surcharge ou par une maladresse au cours du montage.

1.2.4. — *LES RÉSISTANCES AGGLOMÉRÉES.*

Elles sont petites, les plus utilisées, et relativement les moins chères. Leur stabilité est médiocre, leur tension de bruit et leurs coefficients de température et de tension sont appréciables. Correctement utilisées dans des circuits admettant leurs caractéristiques, elles ont une bonne fiabilité.

1.3. — Le marquage des résistances.

Il s'effectue soit en clair, soit selon le code des couleurs normalisé.

En général, les résistances de puissance, de précision, à haute stabilité et les modèles spéciaux sont marqués en clair.

En revanche, les résistances agglomérées ou à couche d'usage courant sont marquées selon le code des couleurs.

Si la résistance est trop petite pour recevoir toutes les indications normalisées, elles sont portées sur l'emballage. Les résistances marquées selon le code des couleurs sont petites et ne peuvent recevoir sur le corps que leur valeur ohmique et la tolérance au moyen de quatre anneaux colorés. Les autres indications sont portées sur l'emballage (modèle, nom et marque du fabricant, dissipation, date de fabrication).

Le code des couleurs est donné par le tableau ci-après. Les anneaux sont disposés selon la figure 2 - 3. Il répond à la recommandation C.E.I. 62 (1952).

Couleurs	Premier chiffre significatif	Deuxième chiffre significatif	Coefficient de multiplication	Tolérance
argent			0,01	± 10 %
or			0,1	± 5 %
noir	0	0	1	
brun	1	1	10	± 1 %
rouge	2	2	10^2	± 2 %
orange	3	3	10^3	
jaune	4	4	10^4	
vert	5	5	10^5	
bleu	6	6	10^6	
violet	7	7		
gris	8	8		
blanc	9	9		

Le premier en partant de la gauche et au bord de la résistance donne la valeur du premier chiffre. Le second anneau indique la valeur du second chiffre, le troisième le coefficient de multiplication et le quatrième la tolérance. L'absence du quatrième anneau indique que la tolérance de la résistance est ± 20 %.

Le nombre de décimales est indiqué par la teinte or ou argent du troisième anneau. L'or correspond à 0,01 fois les deux premiers chiffres indiqués et l'argent à 0,01 fois et cela seulement pour les résistances agglomérées.

1.4. — La normalisation des valeurs.

Avant la normalisation (recommandation C.E.I. 63 — 1952), chaque constructeur possédait sa propre liste de valeurs, ce qui créait une certaine confusion sur le marché. Il a paru logique d'adopter une liste de valeurs en progression géométrique, tenant compte des tolérances. Il est, en effet, inutile

de tenir en stock des valeurs trop voisines qui se recoupent par leurs tolérances. Les listes normalisées pour les tolérances de ± 5 %, ± 10 %, ± 20 % sont données par le tableau ci-après. Ces listes s'appellent respectivement E 24 (24 valeurs par décade), E 12 et E 6.

Pour les résistances de précision à ± 1 %, il existe une liste E 96 qui comporte 96 valeurs par décade, mais qui n'est pas très employée.

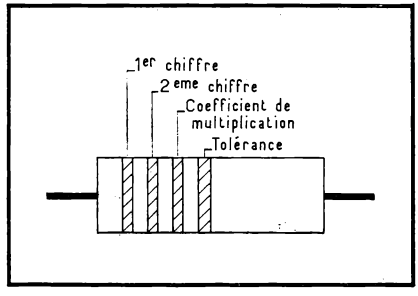


Fig. 2 - 3. — Disposition des anneaux colorés sur une résistance.

Bien entendu, il est fabriqué tous les multiples décimaux de ces listes jusqu'à la valeur maximale prévue pour ce modèle. La plage la plus étendue va de 10 Ω à 10 M Ω.

Par conséquent, le fait de relever sur un schéma une valeur de 47 k Ω ± 20 % ne signifie pas qu'il s'agit d'une résistance de précision, mais d'une valeur normalisée.

Tolérance ± 5 % E 24	Tolérance ± 10 % E 12	Tolérance ± 20 % E 6	Tolérance ± 5 % E 24	Tolérance ± 10 % E 12	Tolérance ± 20 % E 6
10	10	10	36		
11			39	39	
12	12		43		
13			47	47	47
15	15	15	51		
16			56	56	
18	18		62		
20			68	68	68
22	22	22	75		
24			82	82	
27	27		91		
30			100	100	100
33	33	33			

1.5. — Les essais normalisés.

Les essais climatiques, mécaniques et généraux à faire subir aux composants électroniques ont été normalisés. Ils font l'objet des publications suivantes :

C.E.I. 68 (1960) ;
C.C.T. 01.01 A (1962) ;
U.T.E. C 93.001 (1961).

2. — LES RÉSISTANCES BOBINÉES.

2.1. — Le fil résistant.

Pour réaliser une résistance, le plus simple consiste à prendre un fil ayant une certaine résistivité dont on calcule la longueur et la section, afin d'obtenir la résistance et la puissance désirées. La section du fil est déterminée par la puissance à dissiper en chaleur de façon que sa température soit inférieure à celle admise en service courant par le fil et par le support.

Afin que la longueur du fil ne soit pas trop importante, on choisit un métal ou un alliage ayant une résistivité élevée. D'autre part, on désire que son coefficient de température soit le plus faible possible, afin d'avoir une bonne stabilité.

Les métaux simples ne conviennent pas car ils ont une résistivité faible et un coefficient de température élevé.

La métallurgie moderne a mis au point des alliages ayant une résistivité élevée, un coefficient de température faible pour une plage de température très large.

Certains alliages ont un coefficient de température très variable, parfois positif, puis négatif, dans la plage de température d'utilisation.

Les alliages au nickel-chrome sont les plus intéressants et ils sont utilisés pour les résistances de puissance et les résistances de précision. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

Caractéristiques	Résistances de puissance	Résistances de précision	Unités
Résistivité (ρ)	108	133	$\mu\Omega$. cm
Coefficient de température (α)	130	$\pm$ 10 à $\pm$ 20	10^{-6}/°C
Température maximale d'utilisation.	1 000	300 à 150	° C

Les alliages au nickel-cuivre (constantan) sont encore employés pour la fabrication des résistances de précision de faible valeur ohmique. Ils ont une résistivité faible (50 $\mu\Omega$.cm) et un coefficient de température voisin de zéro ($\pm$ 10.10^{-6}). La température maximale d'utilisation est de 500° C.

Ces alliages sont livrables, soit en fils nus ou oxydés, soit en fils émaillés (classe F 155° C), soit en rubans nus ou oxydés.

La fabrication des rubans et des fils de section appréciable ne rencontre pas de difficultés spéciales. Ils permettent la construction des résistances de faible valeur ohmique.

En revanche, pour atteindre les valeurs élevées qui sont nécessaires à l'industrie électronique, il a fallu mettre au point la fabrication de fils très fins particulièrement délicate.

Les normes prescrivent des fils de 63, 45 et 38 μ. Il existe cependant des fils atteignant 15 et même 10 μ. Pour obtenir des résistances précises, il faut que le diamètre du fil soit bien régulier, c'est-à-dire que le tréfilage doit être parfait. Il est suivi d'un recuit entre 800° C et 900° C pour les alliages au nickel-chrome sous atmosphère inerte pour stabiliser leurs caractéristiques.

2.2. — Les résistances bobinées de puissance.

Elles sont utilisées dans les circuits d'alimentation comme ponts diviseurs de tension. Leur précision peut n'être pas très rigoureuse ; leur variation en fonction de la température n'est pas critique. Elles doivent supporter la dissipation de puissance prévue sans aucune altération du fil, du support ou de l'isolant, c'est-à-dire être très robustes.

2.2.1. — *FABRICATION.*

Ces résistances sont composées d'un support, d'un fil bobiné et généralement d'une protection. Les sorties se font par fil, pour les faibles puissances, par bague ou par collier pour les puissances élevées.

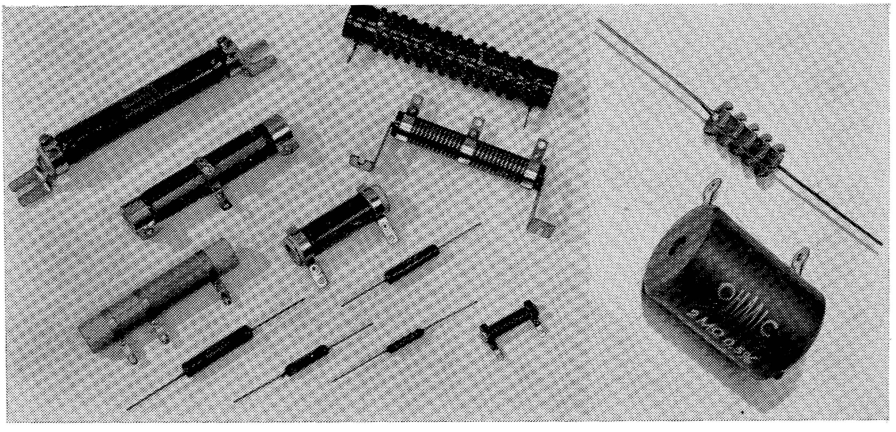


Fig. 2 - 4. — Principaux modèles de résistances bobinées de puissance et de précision (à droite, modèle de précisicn Ohmic ; **à gauche, modèles de puissance** Sfernice)

Le support est constitué par un corps isolant tenant aux températures élevées. Il est généralement soit en *porcelaine,* soit de préférence en *stéatite,* soit enfin très récemment en *alumine* agglomérée. L'alumine possède une conductibilité thermique 20 fois supérieure à celle de la stéatite. On améliore ainsi de 33 % la dissipation des calories.

Le support est généralement un tube, soit lisse, soit nervuré en hélice pour maintenir le fil. Sa dilatation doit être du même ordre de grandeur que celle du revêtement de façon à éviter toute tension mécanique qui se traduit par des fissures. A ce moment, la protection contre les agents extérieurs est illusoire. C'est pourquoi les fabricants se sont livrés à des études très importantes en vue de mettre au point des formules de céramiques et d'émaux donnant satisfaction.

Pour les résistances de faible valeur et de forte puissance on utilise un ruban bobiné à plat ou sur la tranche à spires espacées sur un support lisse. Le ruban peut être en nickel-chrome, ou en nickel-cuivre.

Au fur et à mesure que la valeur ohmique augmente, pour une puissance déterminée, le diamètre du fil diminue. Le gros fil nu est maintenu par la ner-

vure en hélice du support. Un fil nu, non protégé, ne peut être très fin car il devient trop fragile aux chocs mécaniques et à l'oxydation au contact de l'air. Un fil au-dessous de 100 μ devrait toujours être protégé.

Le fil plus fin est bobiné à spires espacées sur un support lisse s'il est nu, et à spires jointives s'il est isolé. La température du fil isolé est limitée par l'émail et par l'oxyde à 155° C, tandis que les fils nus protégés peuvent atteindre 400° C si le fil le permet. On peut utiliser ainsi des fils jusqu'à 15 μ de diamètre. En effet, il est protégé de l'oxydation par le revêtement qui améliore sa conductibilité thermique donc son refroidissement.

Les fils de sortie sont en cuivre étamé. Les bagues peuvent être en laiton ou en nickel. Le fil résistant est soudé sur les sorties soit par point électrique, soit par une soudure à haute température.

Il existe trois sortes de protections : la peinture cuite au four, le ciment incombustible et la vitrification.

La peinture cuite au four est utilisée pour la protection sommaire des résistances destinées au matériel grand public, elles sont limitées à 125° C (classe C de la norme C 93.210).

Les résistances cimentées sont prévues pour une température maximale superficielle de 175° C (classe B) ou 260° C (classe A).

Les résistances vitrifiées sont les meilleures et les plus courantes sur le matériel professionnel. Elles peuvent atteindre au point le plus chaud entre 350° C et 400° C. Les normes sont moins sévères et prévoient 275° C (classe G de la spécification C.C.T. 04.02 A) et 350° C (pour la classe V de la même spécification).

2.2.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les normes et spécifications se rapportant à ces résistances sont les suivantes :

C.C.T. 04.02 A (1961). — Résistances fixes bobinées à forte dissipation.
C.C.T. 04.07 (1961). — Résistances bobinées ajustables à forte dissipation.
U.T.E. C 93.210 (1959). — Résistances fixes bobinées : règles.
U.T.E. C 93.211 (1961). — Résistances fixes bobinées : spécifications.

Leurs principales caractéristiques sont :

— *tolérances :* ± 10 %, ± 5 % ;

— *gamme des valeurs :* série E 24, la série E 12 est préférentielle ;

— *tension aux bornes :*
résistances nues ou peintes : 7 V/mm de longueur du corps,
résistances sous ciment ou vitrifiées : 12 V/mm (certains modèles vitrifiés atteignent même 19,5 V/mm) ;

— *stabilité :* le coefficient de température est faible, et les variations occasionnées par un choc thermique, par l'humidité ou par une surcharge passagère ne sont pas importantes. Toutes ces causes peuvent entraîner à la longue une variation de résistance maximale de 5 % ;

— *tension de bruit :* négligeable ;

— *température maximale :* dépend des classes définies par les normes entre 125° C et 350° C ; température minimale pour le matériel professionnel — 55° C.

(Il faut se souvenir que des résistances placées verticalement admettent 10 % de puissance de plus que les mêmes résistances montées horizontalement, pour un même échauffement. Si on doit prévoir plusieurs résistances dans le même châssis, il faut les espacer suffisamment, afin de permettre leur refroidissement. Pour dix résistances espacées chacune de 63 mm en air libre, la puissance admissible est réduite de moitié. En coffret fermé, elle n'est plus que de 35 %. On voit que ce point est fort important.

Les constructeurs donnent, pour chacun de leurs modèles, une courbe indiquant la réduction de la puissance en fonction de la température de l'ambiance.)

— *fiabilité :* pour être certain de leur fiabilité, il ne faut pas les utiliser à plus de 50 % de leur puissance nominale, dans les conditions les plus dures. Il ne faut pas, non plus, choisir les modèles construits avec un fil inférieur à 45 μ de diamètre. Les très petites résistances bobinées n'étant pas suffisamment fiables, il vaut mieux adopter des modèles à film métallique qui sont plus robustes.

2.2.3. — *PRINCIPAUX MODÈLES FABRIQUÉS.*

— *Les résistances nues fixes ou ajustables,* pour matériel grand public et pour les essais de laboratoire.

Gamme des valeurs : d'une fraction d'ohm à 1 000 Ω environ.

Puissance : 8 à 500 W.

— *Les résistances semi-vitrifiées de faible valeur ohmique et de forte puissance,* constituées par un ruban bobiné à plat ou sur la tranche. La vitrification assure la fixation du ruban sur le tube support. Elles sont employées surtout pour le démarrage des moteurs électriques.

Gamme des valeurs : 0,07 Ω à 47 Ω.

Puissance : 100 W à 1 kW.

— *Les résistances peintes et cuites au four* sont destinées au matériel grand public. Elles résistent assez bien à l'humidité mais pas au climat tropical. Leur prix est intéressant.

Gamme des valeurs : 0,5 Ω à 2 000 Ω pour le modèle 1 W ; 200 Ω à 200 kΩ pour le modèle 180 W.

— *Les résistances cimentées* sont utilisées sur le matériel grand public et sur le matériel professionnel ne nécessitant pas un service très dur.

Gamme des valeurs : 1 Ω à 1 500 Ω pour le modèle 1 W ; 2,2 Ω à 100 kΩ pour le modèle 40 W.

— *Les résistances vitrifiées* répondent aux nécessités les plus dures prescrites pour le matériel professionnel.

Gamme des valeurs : 1 Ω à 10 kΩ pour le modèle 10 W ; 8,2 Ω à 100 kΩ pour le modèle 500 W.

Des résistances spéciales peuvent être fabriquées sur demande ; par exemple, *Sfernice* a réalisé récemment une résistance de 3 MΩ sur un tube de 100 mm de diamètre et de 1,80 m de hauteur en fil de 25 μ admettant 50 000 V aux bornes, soit 800 W.

— *Les résistances vitrifiées ajustables* sont destinées au matériel professionnel. Le fil n'étant pas complètement protégé ne peut avoir un diamètre inférieur à 100 μ.

Gamme des valeurs : 33 Ω à 1 500 Ω pour le modèle 20 W ; 330 Ω à 22 kΩ pour le modèle 180 W.

— *Les résistances vitrifiées à sorties axiales* sont prévues pour le matériel professionnel, mais n'assurent pas une fiabilité absolue lorsque le fil est trop fin pour les valeurs élevées.

Gamme des valeurs : 3,3 Ω à 4,7 kΩ pour le modèle 3 W ; 3,3 Ω à 56 kΩ pour le modèle 36 W.

A l'étranger, on rencontre des résistances sous tubes de verre ou de porcelaine scellés sur le support admettant 275° C. Ces modèles tendent à être remplacés par les résistances vitrifiées.

2.3. — Les résistances bobinées de précision.

Elles sont utilisées partout où l'on a besoin d'une précision supérieure à ± 1 %, une stabilité absolue et une absence totale de bruit de fond. Ce sont des modèles professionnels, d'un prix élevé.

2.3.1. — *FABRICATION.*

Le fil choisi doit avoir le coefficient de température le plus faible possible ; il est en nickel-cuivre pour les faibles valeurs et en nickel-chrome pour les valeurs moyennes et élevées. La température maximale admissible plus faible n'a aucune importance dans le cas présent. En effet, pour avoir une précision poussée, il faut éviter l'échauffement de la résistance en la surdimensionnant. Ce fil est soit émaillé, soit isolé à la soie.

Il y a quelques années, le support était en céramique, mais cette fabrication

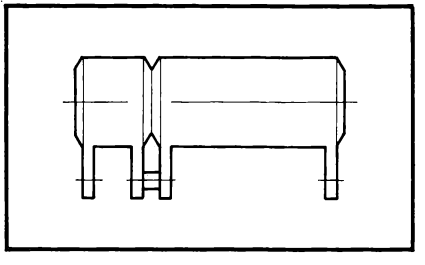


Fig. 2 - 5. — Résistance bobinée de précision. On remarque la résistance d'appoint modèle Ohmic)

tend à disparaître pour être remplacée par une version tout plastique. Le support, l'imprégnant et l'épaisse protection extérieure sont en *araldite*. Ainsi, on obtient un ensemble homogène qui réagit de la même façon aux variations de température et qui est absolument hermétique.

Le support est donc en araldite chargée avec des gorges ; au moins deux pour les petits modèles, généralement quatre et parfois jusqu'à huit pour les grands modèles. Chaque séparation comporte deux encoches pour passer le fil et inverser le pas.

Le fil isolé est bobiné dans la première gorge, puis le sens est inversé pour la seconde gorge et ainsi de suite. Le nombre de spires étant le même dans chacune des gorges on obtient une inductance résultante très faible.

Les petits modèles ont des sorties axiales ; les fils sont ancrés dans le support. Dans les modèles importants les sorties se font par cosses dont la base est noyée dans les flasques extrêmes du support.

La fabrication doit se faire avec beaucoup de soin et avec des matières premières de très grande pureté.

Puis, la résistance est passée à l'étuve et surmoulée à l'araldite. L'ensemble forme un bloc compact, étanche et indestructible. Elle est stabilisée par un traitement thermique qui la porte successivement à — 55° C, puis à + 105° C pendant plusieurs heures. Elle est ensuite mesurée, marquée et un certificat joint donne ses différentes caractéristiques. On obtient ainsi des précisions

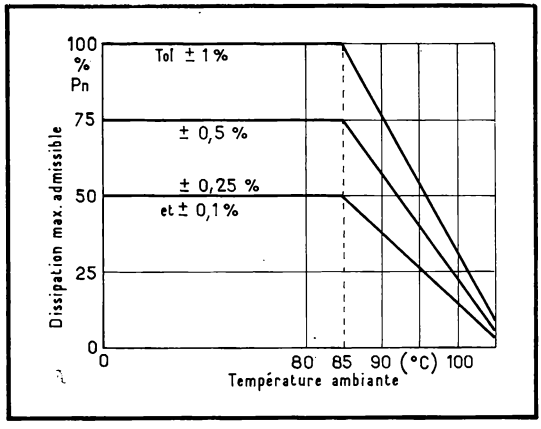


Fig. 2 - 6. — Spécification CCT 04-05. Dissipation maximale en fonction de l'ambiance et de la précision désirée.

jusqu'à ± 0,25 %. Pour les précisions supérieures (± 0,1 et ± 0,05 %), on fabrique une première résistance qui est surmoulée, traitée thermiquement et mesurée. Puis, on ajoute une seconde résistance en série qui complète à la valeur désirée (fig. 2 - 5).

2.3.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Ces résistances satisfont à la spécification C.C.T. 04.05 mod 2 (1962).

Les résistances de précision doivent être largement dimensionnées afin qu'elles s'échauffent le moins possible. La spécification indique la température maximale de la résistance en fonction de la précision désirée (fig. 2 - 6). On voit que, pour ± 0,25 % et ± 0,1 %, il ne faut pas dépasser la moitié de la puissance nominale. Cette valeur est à recommander pour augmenter la fiabilité et la stabilité. Il faut absolument éviter les surcharges en tension ou en puissance, même momentanées. Les résistances au-dessus de 1 MΩ ne sont pas pratiques à cause de leurs dimensions et de leur prix.

Bien qu'elles aient une inductance faible, par suite de leur bobinage fractionné, elles ont une capacité répartie plus forte due au bobinage en vrac et leur caractéristique en H.F. ne permet pas leur utilisation aux fréquences élevées.

Le fil le plus fin pouvant être employé est de 38 μ pour les résistances non hermétiques et 25 μ pour les modèles hermétiques.

2.3.3. — *PRINCIPAUX MODÈLES FABRIQUÉS.*

— *Les résistances à sorties axiales.*

Tolérances : ± 1 %, ± 0,5 %, ± 0,25 % et ± 0,1 %.

Gamme des valeurs : entre 0,1 Ω et 150 kΩ pour le modèle 0,15 W (tension maximale aux bornes : 250 V) ; entre 0,1 Ω et 600 kΩ pour le modèle 0,4 W (tension maximale aux bornes : 600 V).

— *Les résistances à sorties par cosses radiales.*

Mêmes tolérances.

Gamme des valeurs : entre 0,1 Ω et 0,7 MΩ pour le modèle 0,25 W (tension maximale aux bornes : 250 V) ; entre 0,1 Ω et 8 MΩ pour le modèle 1 W (tension maximale aux bornes : 2 000 V).

A l'étranger on rencontre des *modèles de précision pour tensions élevées* placés dans un tube de céramique étanche. Une série admet uniformément un courant permanent de 1 mA. Elle se compose de trois modèles : de 0,5 à 12 MΩ d'où une tension maximale aux bornes de 12 kV.

— *Les résistances de précision moyenne non inductives* sont bobinées selon le procédé Ayrton-Perry (fig. 2 - 7). Sur un tube de céramique lisse, on bobine en sens inverse deux enroulements isolés qui sont branchés en parallèle. Si les deux enroulements sont bien symétriques, les tensions aux points de contact des fils sont nulles et les problèmes d'isolement ne se posent pas. Ces résistances sont ensuite vitrifiées ou recouvertes de ciment. Le tableau ci-après donne les inductances pour quatre résistances de même fabrication, bobinées normalement et bobinées selon le procédé Ayrton-Perry (I.R.C.).

Malgré cela, elles ne conviennent pas aux fréquences très élevées et on doit leur préférer les résistances à film métallique.

Puissance (W)	Résistance (Ω)	Inductance (μH)	
		Résistances normales	Résistances non inductives
10	1 000	66	0,6
20	100	14	0,25
50	80	76	0,3
100	4 000	3 360	0,3

3. — LES RÉSISTANCES NON BOBINÉES.

3.1. — Généralités.

Les résistances non bobinées sont prévues généralement pour une puissance dissipée maximale de 2 W. Elles sont plus petites et plus économiques que les résistances bobinées. L'élément résistant peut être à base de carbone ou constitué par un film métallique. Depuis peu on fabrique des résistances de puissance à film métallique.

Les résistances non bobinées sont classées en deux grandes catégories :

les résistances d'usage courant dont la stabilité est moyenne, mais dont le prix est faible ; ce sont les résistances agglomérées et les résistances à couche dites d'usage courant ;

les résistances à haute stabilité comprenant les résistances à couche de carbone dites à haute stabilité et les résistances à couche métallique.

En outre, elles peuvent différer dans ces catégories par la protection. On distingue :

les résistances non isolées dont la protection est formée par une mince couche de vernis ou de plastique, parfois par un enrobage de résine synthé-

tique ; ces protections ne sont pas parfaitement étanches et ne supportent pas les essais de tension normalisés ;

les résistances isolées qui sont protégées par un revêtement moulé ou par un tube de résine, de verre, de céramique et même parfois de métal ; les résistances isolées, mieux protégées peuvent être utilisées dans des conditions plus sévères ; de plus elles peuvent être plaquées contre une surface métallique sans risque de court-circuit.

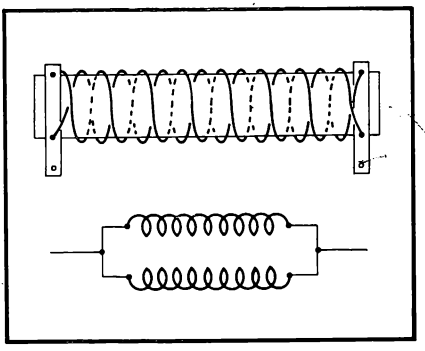


Fig. 2-7. — Bobinage anti-inductif (Ayrton-Perry).

Les caractéristiques générales des résistances non bobinées sont les suivantes :

TENSION MAXIMALE AUX BORNES.

Elle est différente pour les deux catégories :

P_n (W)	1/10 ou 1/8	1/4	1/2	1	2
Résistances d'usage courant	(1/10) 150 V	250 V	350 V	500 V	500 V
Résistances à haute stabilité	(1/8) 250 V	300 V	350 V	500 V	750 V

COEFFICIENT DE TENSION.

Résistances agglomérées : doit être inférieur à 350.10^{-6}/V pour 0,25 et 0,5 W et inférieur à 200.10^{-6}/V pour 1 et 2 W.

Résistances à couche de carbone : compris entre 10 et 30.10^{-6}/V.

Résistances à film métallique : compris entre 5 et 20.10^{-6}/V.

Ce sont les résistances agglomérées qui ont le coefficient de tension le plus élevé, il faut en tenir compte.

TENSION DE BRUIT.

Elle provient surtout du *bruit de courant* qui est provoqué par le passage du courant dans la résistance.

Le bruit blanc ou bruit thermique est toujours très faible. La tension de bruit contient surtout des fréquences basses inférieures à 10 kHz donc audibles. Elle s'exprime en μ V/V et elle augmente avec la valeur ohmique de la résistance.

Elle est comprise entre :
1 et 10 μ V/V pour les résistances agglomérées ;
0,1 et 2 μ V/V pour les résistances à couche de carbone ;
0,001 et 0,01 μ V/V pour les résistances à couche métallique.

DISSIPATION ADMISSIBLE.

Afin d'obtenir une meilleure stabilité, on doit éviter de dépasser 70 % de la dissipation nominale pour les résistances d'usage courant et 50 % pour les résistances à haute stabilité. Une prédétermination aussi précise que possible de la température ambiante est nécessaire afin d'éviter les surcharges.

CHOIX DES VALEURS.

On doit éviter d'utiliser des valeurs ohmiques très élevées, supérieures à 2,2 MΩ, dont la stabilité est réduite et celles inférieures à 10 Ω dont les sorties occasionnent parfois des incidents. Si, pour accroître la dissipation, on utilise une combinaison de résistances on doit préférer le *groupement en série.*

CABLAGE ET SOUDURE.

Il convient de disposer les fils des résistances de façon à éviter les contraintes, en particulier, celles dues à la dilatation des supports provoquée par les variations de température du matériel.

La stabilité d'une résistance peut être affectée si la soudure des sorties a été mal exécutée. Il y a lieu de prendre les précautions suivantes :

— souder à 10 mm au moins du corps de la résistance, sinon utiliser des pinces de refroidissement,
— chauffer juste le temps nécessaire pour que la soudure soit réussie,
— employer une soudure de qualité à fusion rapide,
— ne pas utiliser un fer trop chaud ou trop puissant.

LES DIFFÉRENTS MODÈLES.

RÉSISTANCES D'USAGE COURANT :

— *les résistances au carbone aggloméré* (1/10 à 2 W) sont isolées, elles sont sûres et de faible prix ; en revanche leur stabilité globale est de l'ordre de 20 à 25 % ; leur tolérance normale est de ± 10 %, un étalonnage plus fin est illusoire ;

— *les résistances à couche de carbone* (1/4 à 1 W) peuvent être : à *couche déposée* dont la stabilité est comparable à celle des résistances agglomérées, elles sont généralement isolées ; à *couche de carbone pyrolytique* non isolées ou isolées plus stables. Leurs tolérances normales sont ± 10 % et ± 5 %.

RÉSISTANCES A HAUTE STABILITÉ :

— *les résistances à couche de carbone* (1/8 à 2 W) pyrolytique, isolées, d'une stabilité globale de 3 à 4 % et dont les tolérances normales sont ± 5 %, ± 2 %, ± 1 % ;

— *les résistances à couche métallique* (1/16 à 2 W) isolées ou non, d'une stabilité globale de 1 à 1,5 % ; leur tolérance normale est de ± 1 % ; sur demande, on peut obtenir ± 0,5 %, ± 0,2 % et même dans certains cas ± 0,1 %.

ABAQUES A POINTS ALIGNÉS.

La figure 2 - 8 se rapporte aux résistances d'usage courant et la figure 2 - 9

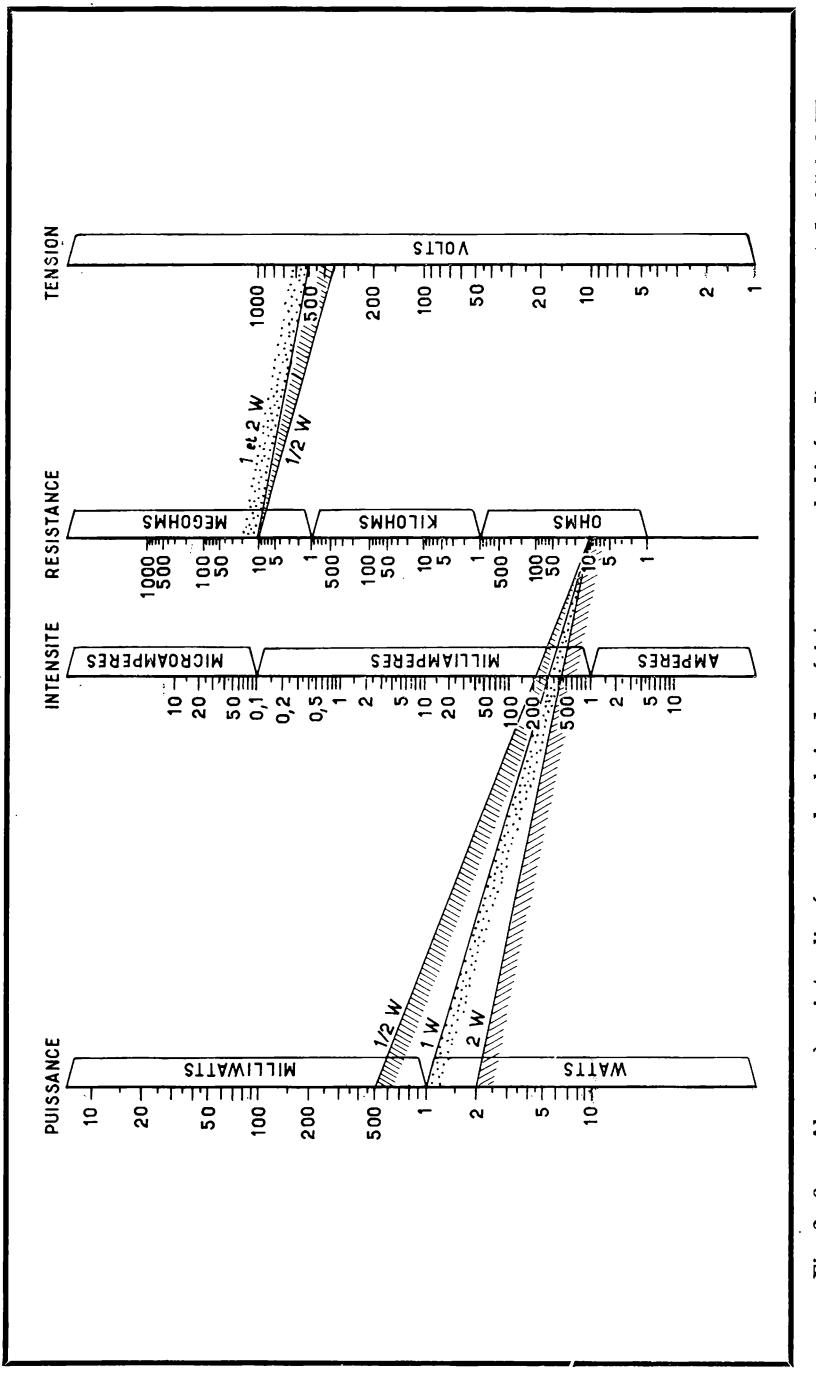


Fig. 2 - 8. — Abaque à points alignés pour le choix des résistances non bobinées d'usage courant de 0,5 à 2 W.

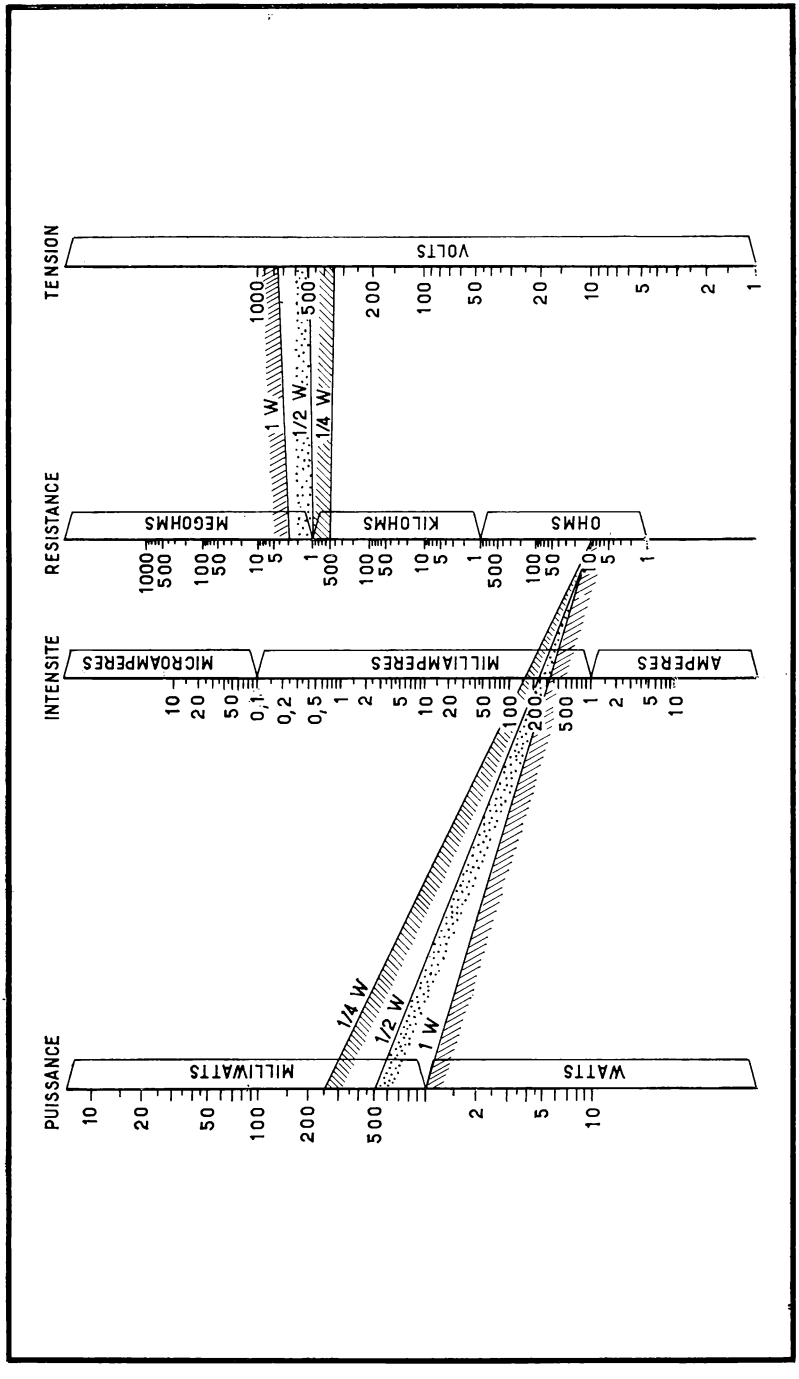


Fig. 2 - 9. — Abaque à points alignés pour le choix des résistances non bobinées à haute stabilité de 0,25 à 1 W.

aux résistances à haute stabilité. Ces abaques permettent de faire le choix d'une résistance et de vérifier ses conditions de travail.

Ils donnent la puissance, la tension aux bornes, l'intensité et la résistance. Il suffit de connaître deux paramètres et de les aligner : la droite qui les joint donne les deux autres. Cette droite ne doit jamais pénétrer dans les zones interdites (hachurées) qui correspondent à une surcharge du modèle considéré. Ces zones interdites sont tracées pour des températures ambiantes inférieures ou égales à la température maximale d'emploi à pleine charge. Si la température ambiante est supérieure, il faut en tenir compte et retracer les zones interdites.

3.2. — La fabrication des résistances à couche de carbone.

3.2.1. — *PAR DÉPOT DE CARBONE.*

C'est le procédé le plus ancien qui est en voie de régression (fig. 2 - 10). Le support est constitué par un tube de verre spécial, sur lequel on dépose au

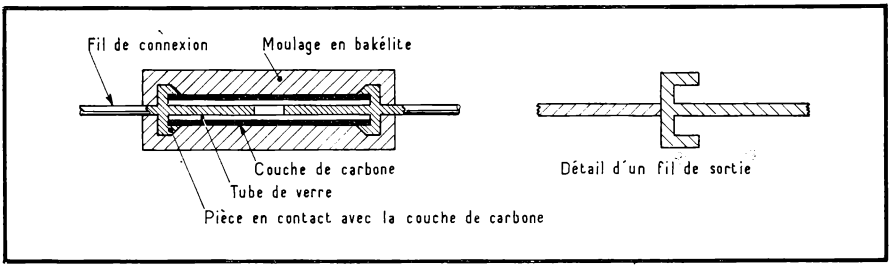


Fig. 2 - 10. — Résistance à couche de carbone déposée, modèle isolé (type B.T., I.R.C.).

pistolet ou au trempé une couche régulière de carbone et de résine liquide. La valeur correcte de la résistance est obtenue en modifiant la proportion de carbone, de graphite, de résine et de solvant. On obtient une couche ayant une résistivité contrôlée entre des limites très larges. C'est un procédé voisin de celui utilisé pour le dépôt des pistes de potentiomètres.

Puis, le tube est coupé afin que chaque longueur représente une résistance. Il est introduit dans un four continu dans lequel le dépôt est cuit aux infrarouges, entre 125° C et 150° C. Les extrémités sont métallisées de façon à assurer un bon contact avec les sorties.

Les sorties ont une forme particulière. Les fils sont introduits dans le tube jusqu'à ce que la collerette vienne en contact avec la métallisation et la couche. Cette disposition permet un bon refroidissement de la couche résistante par conduction au travers du verre. Par contre, elle augmente la capacité parasite.

L'élément est ensuite moulé avec de la résine thermodurcissable. Il est enfin mesuré et marqué selon le code des couleurs.

Il faut remarquer que l'élément résistant n'est pas composé de carbone pur, mais d'un mélange de carbone et d'isolant. C'est pourquoi la stabilité et le bruit de fond de ces modèles se rapprochent de ceux mesurés pour les résistances agglomérées.

3.2.2. — *PAR CRACKING DE CARBONE (pyrolyse).*

C'est le procédé moderne qui se développe de plus en plus. Le support est constitué par un bâtonnet de céramique dont la composition est voisine de celle utilisée pour les supports de résistances bobinées. Le bâtonnet est extrudé, puis cuit au four à 1250° C et enfin poli, car sa surface ne doit pas présenter d'irrégularités. Il est revêtu de carbone selon deux variantes :

— *four à production discontinue :* les bâtonnets sont placés en vrac dans un four électrique à parois épaisses ; on fait à l'intérieur un vide meilleur que 0,1 mm Hg, tandis que sa température est portée entre 900° C et 1100° C ; à ce moment, on injecte dans le four une quantité strictement contrôlée d'hydrocarbure (méthane ou benzine) ; le gaz se décompose et le carbone se dépose sur tous les bâtonnets ainsi que sur les parois du four ; l'épaisseur de la couche est fonction du volume d'hydrocarbure ;

— *four tunnel continu* (fig. 2 - 11) : c'est la variante la plus moderne ; les bâtonnets de céramique sont placés dans un magasin à droite du four ; celui-ci est traversé dans toute sa longueur par un tube de quartz qui tourne sur lui-même ; les bâtonnets sortant du magasin sont poussés dans le four par un système mécanique représenté par la flèche ; ils sont calés entre la paroi du four et le tube de quartz, ils tournent donc sur eux-mêmes ; le four est chauffé par induction de façon progressive ; les bâtonnets traversent la zone de préchauffage où ils sont portés à 1100° C ; le méthane pur est introduit dans la zone de cracking dont l'atmosphère est inerte ; son débit est strictement contrôlé ; cette zone étant moins chaude (900° C), les bâtonnets arrivent ainsi légèrement plus chauds que le tube de quartz et le carbone se dépose seulement

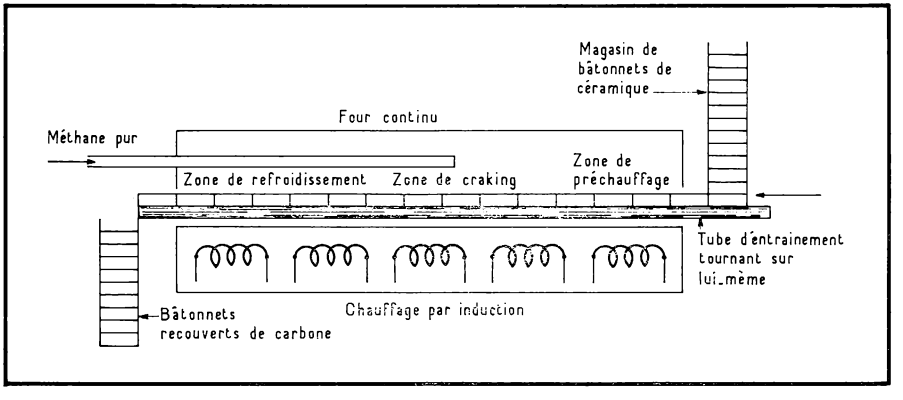


Fig. 2 - 11. — Four tunnel continu pour la fabrication des résistances à couche de carbone pyrolytique.

sur les bâtonnets ; puis, ils passent dans la zone de refroidissement et se déversent dans le magasin situé à gauche du four.

Cette variante permet le contrôle automatique permanent de la fabrication avec correction immédiate des différents paramètres.

Le film de carbone pyrolytique est entièrement cristallisé, il est très adhérent et présente une dureté voisine de celle du diamant.

La détermination de la valeur ohmique peut se faire en fonction de l'épais-

seur de la couche. Cependant, on a observé que les couches très minces, nécessitées par les fortes valeurs, étaient fragiles et instables. Ainsi, par exemple, une couche de 1 μ donne un coefficient de température de $-180.10^{-6}/°$ C, tandis qu'une couche de 1/1 000 μ possède un coefficient de température de $-1\,800.10^{-6}/°$ C, soit dix fois plus élevé. C'est pourquoi on préfère choisir une couche un peu plus épaisse et augmenter sa longueur en traçant une spirale sur le tube (fig. 2 - 12).

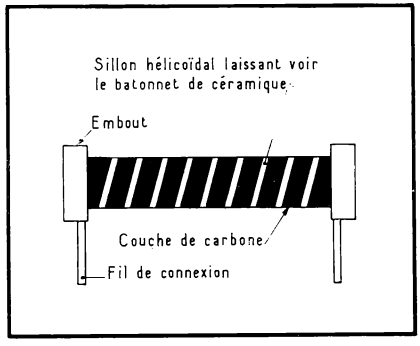


Fig. 2 - 12. — Représentation schématique d'une résistance spiralée.

Le spiralage est réalisé sur un tour spécial par une meule diamantée. Le tour s'arrête automatiquement lorsque la valeur ohmique désirée est obtenue grâce à un pont de mesure. La précision est comprise entre ± 2 % et ± 5 %.

Le sillon a généralement 0,2 mm de largeur et son pas est de 0,6 mm, c'est-à-dire 16 sillons au centimètre. La meule enlève la couche de carbone et met à nu le support de céramique. La résistance est maintenant constituée par un étroit filet de 0,4 mm « bobiné » sur le support. La limitation vers les valeurs élevées est fonction de la longueur de la résistance. On ne peut pas réduire davantage la largeur du filet car il deviendrait trop fragile et la moindre imperfection de la surface du bâtonnet conduirait à son rejet.

Les extrémités des bâtonnets sont métallisées de façon à assurer un bon contact avec les embouts de sortie. Cette métallisation peut se faire à l'étain, à l'argent et même à l'or pour les résistances à haute stabilité.

Les embouts sont généralement en laiton argentés ou dorés à l'intérieur. Ils sont entrés à force sur les extrémités du bâtonnet. Il s'agit là d'une opération délicate, car il est indispensable d'obtenir des contacts absolument fiables malgré les tolérances inévitables sur les dimensions des bâtonnets.

Enfin, la résistance est protégée par un vernis plastique, un enrobage en résine synthétique, un revêtement moulé ou par un tube de résine, de verre ou de céramique.

Les procédés de fabrication sont dans leur principe les mêmes qu'il s'agisse de produire des résistances d'usage courant ou des résistances à haute stabilité. Ce n'est que dans la pureté et le choix des produits utilisés, la précision des machines, la rigueur du déroulement des opérations et la multiplication des contrôles que l'on obtient des résistances à haute stabilité.

3.3. — La fabrication des résistances à couche métallique.

Il s'agit de couches extrêmement minces de métaux nobles ou d'oxydes. Dans les deux cas, les couches sont hétérogènes et leur structure évolue de façon continue entre celle d'un métal et celle d'un semiconducteur.

Les couches de faible valeur ohmique sont en général à structure métallique et leur coefficient de température est positif, tandis que les couches de valeurs élevées sont à structure semiconductrice et leur coefficient de température est négatif. Pour certaines valeurs le coefficient de température peut être nul.

L'épaisseur des couches est extrêmement faible ; elle est comprise entre quelques angströms et quelques milliers d'angströms (Å = 10^{-8} cm). Leur résistivité est très différente de celle des métaux massifs de même nature.

Pour former des couches d'oxydes par *réduction chimique* à la surface d'un support on peut utiliser l'étain, l'antimoine, l'indium auxquels on peut ajouter du cadmium, du zinc, du fer, du cuivre, du chrome pour réduire le coefficient de température. On peut également employer des sels de métaux précieux comme l'or ou le platine.

Les métaux et certains alliages peuvent être *vaporisés sous vide*. On préfère, soit des métaux précieux (or, platine, indium, rhodium, palladium), soit des métaux réfractaires (molybdène, tungstène, tantale, niobium), soit enfin des métaux peu oxydables (chrome, titane, nickel). Les alliages ne peuvent être vaporisés sous vide que si la composition du film ne subit pas de variations. Le plus utilisé est l'alliage nickel-chrome (80/20).

Plusieurs procédés de fabrication sont actuellement exploités.

3.3.1. — *RÉSISTANCES A COUCHE D'OXYDES MÉTALLIQUES (Corning, Sovirel, Sfernice).*

Le support est constitué par un tube ou par une baguette de verre spécial dérivé du Pyrex, c'est-à-dire tenant à haute température.

Il est placé dans un four et porté à 800° C. Une solution de chlorure d'étain est pulvérisée alors sur le support par un jet calibré. Puis, il est refroidi et découpé aux dimensions de la résistance. Les extrémités sont argentées sous vide et stabilisées à 300° C.

Pour les faibles valeurs ohmiques et pour les résistances spéciales pour H.F. aucun spiralage n'est prévu. Mais, il est nécessaire pour les fortes valeurs ohmiques. Il s'effectue de la même façon que pour les résistances à film de carbone.

Puis les embouts sont sertis sur les supports correspondant aux modèles pour faible puissance de 1/16 W à 5 W. Pour les modèles de puissance élevée on prévoit des bagues ou des colliers, comme pour les résistances bobinées.

Les modèles « non isolés » sont revêtus d'une ou de plusieurs couches de peinture au silicone cuite au four à 300° C.

Les modèles « isolés » sont enrobés de résine thermodurcissable au silicone. Certains modèles sont introduits dans un tube de verre de même qualité que le support.

3.3.2. — *RÉSISTANCES A FILM ÉVAPORÉ SOUS VIDE (MCB-Véritable Alter, Stabimétal).*

On choisit comme support, soit des céramiques réfractaires, soit des verres, soit enfin du quartz.

Les contacts de sortie sont déposés avant métallisation par réduction à haute température d'un métal compatible avec le film résistant ; on utilise : l'argent, l'or, le platine...

L'évaporation s'effectue dans un four à vide (10^{-6} mm Hg). Le métal est fondu par effet joule, jusqu'à ce que sa tension de vapeur permette une bonne évaporation (10^{-3} à 10^{-2} mm Hg). L'épaisseur de la couche est comprise entre 100 et 1 000 Å selon la nature du métal et la valeur ohmique à obtenir. Selon les fabricants ce sont, soit des métaux précieux, soit des alliages qui sont employés (or, platine, palladium, rhodium, nickel-chrome...).

L'ajustage à la valeur nominale se fait par spiralage sur les supports cylindriques et par un découpage linéaire en forme de grecque sur les supports plats.

La fixation des sorties et l'enrobage de protection sont classiques.

3.3.3. — *RÉSISTANCES A FILM PHOTOGRAVÉ (Allen Bradley, Painton).*

Le support est constitué par une plaquette de verre sur lequel le film est déposé par photogravure selon la technique des circuits imprimés (fig. 2 - 13).

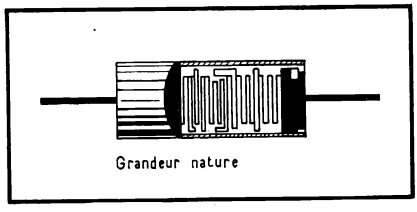


Fig. 2 - 13. — Résistance à film photogravé (Allen-Bradley).

On part d'un disque de verre qui permet la fabrication simultanée d'un grand nombre de résistances. Par exemple, sur un disque de 10 cm de diamètre on obtient, soit 24 résistances 25×12 mm, soit 96 résistances 12×6 mm. On dépose sur le verre un film d'or et de platine (80 % - 20 %) par réduction chimique. Ce film est recouvert par un vernis photosensible. Un cliché négatif est placé sur le disque qui est soumis à la lumière d'une lampe à arc. Le vernis non impressionné est soluble, tandis que les endroits correspondant aux traits restent protégés. La plaque est plongée dans un acide approprié qui élimine le métal non protégé. Le trait de métal restant est visible sur la figure 2 - 13. Il est très fin et peu épais ce qui autorise des valeurs ohmiques maximales élevées.

Les résistances élémentaires sont découpées ; les sorties sont fixées et la protection est réalisée, soit par une enveloppe de résine époxy, soit par un tube de céramique scellé.

3.3.4. — *RÉSISTANCES A FIBRE DE VERRE MÉTALLISÉE (Painton).*

Afin de produire des résistances de fortes valeurs, il a été mis au point un procédé permettant de métalliser une fibre de verre. La fibre souple a un diamètre compris entre 20 et 25 μ. Elle est métallisée au moyen d'un alliage d'or et de platine (60 % - 40 %) sous une épaisseur de 1 000 A. A ce moment la résistance de la fibre de verre est de 800 Ω.cm. Avec une métallisation de zinc et d'antimoine on obtient 80 000 Ω.cm.

Cette fibre est bobinée sur un support en alumine ou en céramique pouvant contenir jusqu'à 100 spires. On peut ainsi obtenir des résistances de 15 MΩ.

Puis, on argente les extrémités de la fibre de verre afin de pouvoir les souder aux fils de sortie. La protection est assurée par tous les moyens classiques.

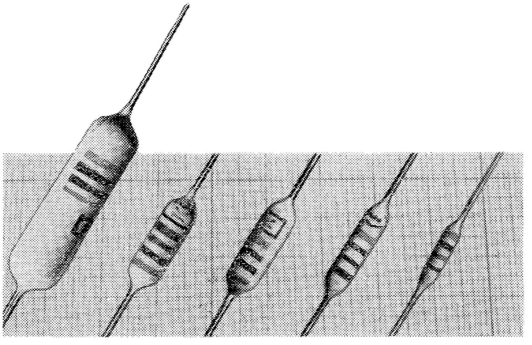


Fig. 2 - 14. — Résistances à couche de carbone d'usage courant, isolées, pour matériel professionnel (Eurista, L.C.C. **type RSX**).

3.4. — Les caractéristiques des résistances à couche.

Les normes et spécifications en vigueur sont les suivantes :

— *C.C.T. 04.04 A* (1961). — Résistances à couche d'usage courant, entre 1/4 et 1 W, isolées ou non, au carbone ou à film métallique.

— *C.C.T. 04.03 A* (1962). — Résistances à couche à haute stabilité, entre 1/8 et 2 W, isolées ou non, au carbone ou à film métallique.

— *C.C.T. 04.06* (1961). — Résistances à couche pour forte dissipation entre 1 et 115 W, isolées ou non, à film métallique.

— *F.N.I.E. 017* (1961). — Résistances à couche de carbone pyrolytique, d'usage courant pour matériel grand public.

— *F.N.I.E. 022.1* (1962). — Résistances fixes non bobinées ; comportement aux fréquences radioélectriques.

— *F.N.I.E. 022.2* (1962). — Résistances fixes non bobinées ; comportement en régime d'impulsions.

— *C.E.I. 109* (1959). — Recommandations pour résistances fixes non bobinées, type II (grand public).

— *C.E.I. 115* (1959). — Recommandations pour résistances fixes non bobinées, type I (professionnel).

3.5. — Les différents modèles fabriqués.

3.5.1. — *RÉSISTANCES A COUCHE D'USAGE COURANT ISOLÉES OU NON.*

Ces résistances sont destinées au matériel professionnel ou au matériel grand public (fig. 2 - 14).

Gamme des valeurs : entre 22 Ω et 1 MΩ (1/4 W) ; et entre 10 Ω et 4,7 MΩ (1 W).

Tolérances : ± 10 %, ± 5 %.

Marquage selon le code des couleurs à quatre anneaux.

3.5.2. — *RÉSISTANCES A COUCHE A HAUTE STABILITÉ ISOLÉES OU NON, POUR MATÉRIEL PROFESSIONNEL.*

Gamme des valeurs : entre 10 Ω et 100 kΩ (1/16 W métal) ; entre 100 Ω et 1 MΩ (1/8 W carbone) ; entre 10 Ω et 2 MΩ (2 W métal) ; entre 10 Ω et 10 MΩ (2 W carbone).

Tolérances : ± 5 %, ± 1 %, tolérances inférieures sur demande.

Marquage : généralement en clair.

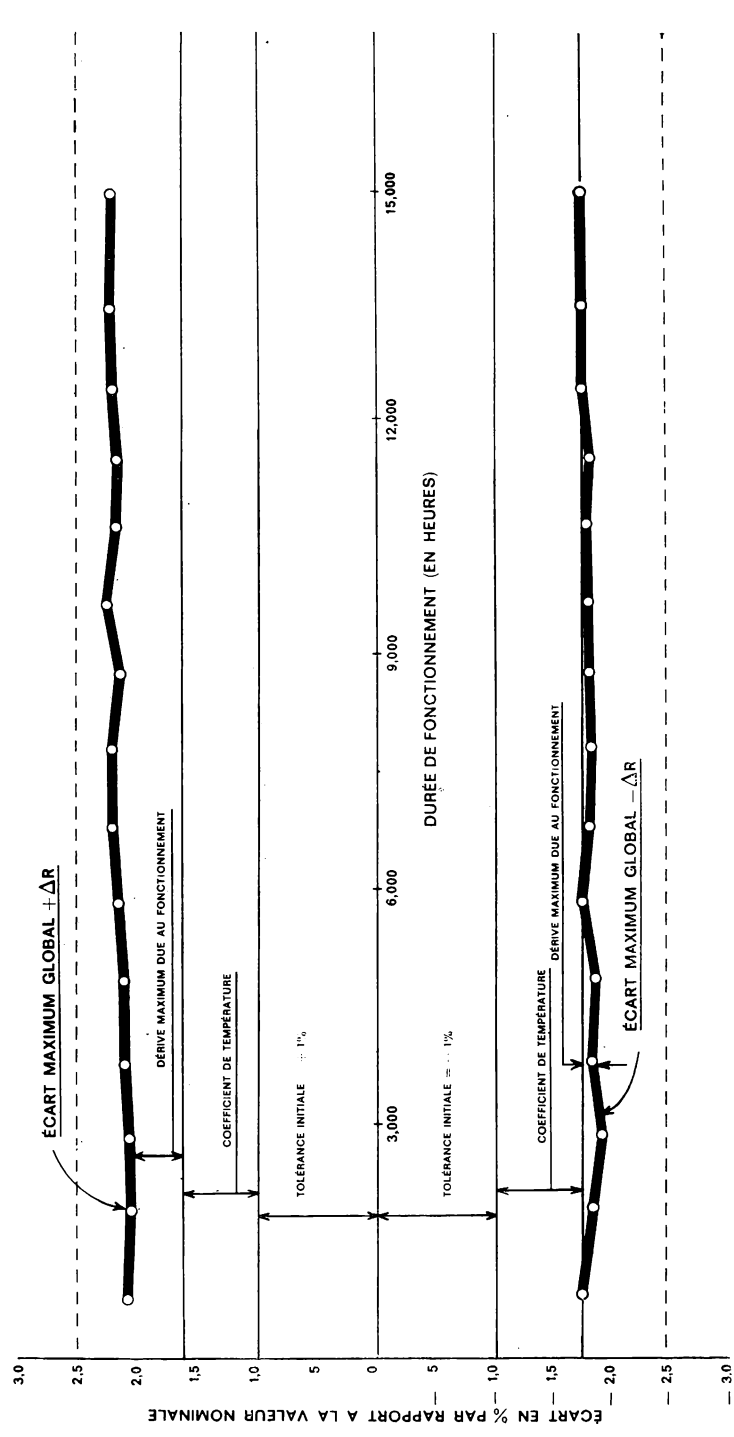


Fig. 2 - 15. — Courbe maximale garantie de dérive pour les résistances à film métallique à haute stabilité (Sovirel type N isolé).

A titre d'exemple, la figure 2 - 15 donne la courbe maximale de dérive garantie pour les résistances à film métallique à haute stabilité *Sovirel*, type N isolé. L'écart maximal est constitué par la somme : de la tolérance initiale de livraison ± 1 %, de la valeur maximale du coefficient de température pour la dissipation nominale à 70° C d'ambiance et de la dérive due au fonctionnement pendant 15 000 heures. Dans ces conditions la dérive totale est inférieure à ± 2,5 %. Les valeurs réelles obtenues sont très au dessous de ce chiffre puisqu'on n'utilise pas les résistances à 100 % et que les résistances n'ont pas toutes la tolérance maximale de fabrication ± 1 %.

3.5.3. — *RÉSISTANCES A COUCHE A FORTE DISSIPATION ISOLÉES OU NON, POUR MATÉRIEL PROFESSIONNEL.*

Selon leur construction, les résistances de puissance peuvent être prévues, soit pour admettre une tension élevée aux bornes (spiralées), soit pour fonctionner sous des fréquences élevées (non spiralées) ; leur valeur ohmique maximale découle de leurs caractéristiques.

Ainsi, par exemple, le modèle *Vitrohm* à couche de carbone fabriqué sur un tube de céramique de 50×500 mm admet 90 W. Le modèle haute tension spiralé à pas large pour éviter les effluves a une résistance maximale de 20 000 MΩ pour une tension aux bornes de 100 000 V.

Le modèle haute fréquence (100 MHz) non spiralé sur le même tube n'autorise qu'une résistance maximale de 6 MΩ pour 8 500 V aux bornes.

Les résistances de puissance à film métallique sont cataloguées dans les modèles classiques jusqu'à 115 W. Il existe des modèles haute fréquence refroidis par eau jusqu'à 5 kW. La figure 2 - 16 montre quelques résistances classiques *Sovirel*.

Elles sont marquées en clair.

3.6. — La fabrication des résistances agglomérées.

Elles sont constituées par un mélange de carbone, de matière isolante et de liant (fig. 2 - 17). Le pourcentage de carbone permet de déterminer la valeur de la résistance pour des dimensions données. Plus il y a de carbone et moins la résistance a une valeur ohmique élevée.

La fabrication s'opère de la façon suivante : la *matière résistante* est composée de silice (isolant), de bakélite (liant), de carbone de pétrole (ρ = 4 000 à 6 000 μ Ω.cm) et de graphite (ρ = 1 000 μ Ω.cm). Ces matières sont réduites en poudre séparément par des broyeurs à billes, puis tamisées. Elles sont mélangées dans la proportion voulue puis additionnées de solvant de façon à former une pâte.

De son côté, un *tube de bakélite* est moulé à chaud entre 200° C et 250° C. Il assure l'isolement de la résistance qui est placée en son centre.

Puis a lieu le *pastillage*. Une machine complexe reçoit : les tubes de bakélite, les fils de sortie terminés par une tête conique et la pâte résistante. En une seule opération, la matière est introduite dans le tube et moulée vers 200° C.

Les caractéristiques sont stabilisées dans un bain d'huile ou de cire à 200° C pendant quelques heures. Ainsi, la température maximale du corps de la résistance peut atteindre 135° C en service normal.

Les résistances sont ensuite triées et marquées selon le code des couleurs à quatre anneaux.

Certains fabricants étrangers remplacent le tube de bakélite d'isolement par un tube de céramique. L'obturation est assurée par un ciment spécial (fig. 2 - 18).

Fig. 2 - 16. — Différentes résistances de puissance à film métallique (Sovirel).

3.7. — Les caractéristiques des résistances agglomérées.

Les spécifications en vigueur sont les suivantes :

C.C.T. 04.01 (1961). — Résistances agglomérées, au carbone, isolées pour matériel professionnel, entre 1/2 et 2 W.

F.N.I.E. 016 (1961). — Résistances agglomérées, au carbone, isolées pour matériel grand public, entre 1/2 et 2 W.

3.7.1. — *COMMENTAIRES SUR LES CARACTÉRISTIQUES.*

HUMIDITÉ.

Ces résistances sont particulièrement sensibles à l'humidité, c'est pourquoi on ne fabrique que des modèles isolés qui doivent être parfaitement étanches. L'humidité entraîne une diminution des résistances de fortes valeurs par suite des fuites superficielles. Par contre, les modèles de faible valeur augmentent à cause de la dilatation de la matière résistante qui sépare les particules conductrices. Ces variations sont généralement réversibles.

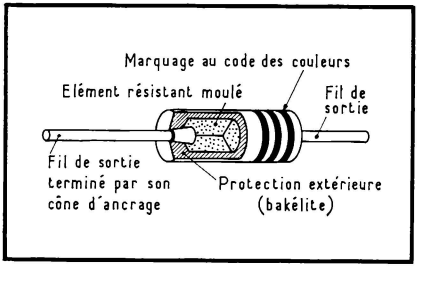


Fig. 2 - 17. — Constitution schématique d'une résistance agglomérée isolée (Ohmic).

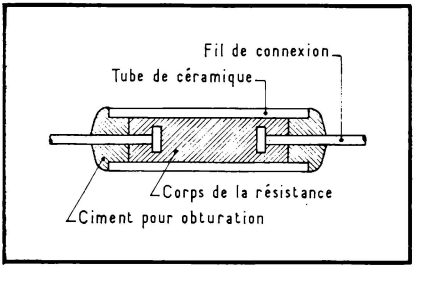


Fig. 2 - 18. — Résistance agglomérée isolée sous tube de céramique (I.R.C.).

TOLÉRANCES.

Pour les modèles grand public, on utilise les tolérances ± 20 % et ± 10 %. Dans les spécifications professionnelles, il est porté ± 10 % et ± 5 %, cette dernière tolérance est illusoire par suite de la stabilité médiocre de ce type de résistance.

Il faut également faire attention aux tolérances obtenues par le tri de la fabrication. En effet, à ce moment on observe un « trou » au milieu de la tolérance. Seules les résistances de la tolérance la plus serrée se répartissent selon une loi gaussienne. Les tolérances plus larges ont un manque complet de valeurs précises.

BRUIT.

On sait que les résistances agglomérées produisent un bruit assez important. Sa valeur dépend du mode de fabrication, des dimensions, de la valeur ohmique et de la tension aux bornes. Elle ne suit pas une loi bien précise.

Dans ces conditions, on ne doit pas utiliser des résistances agglomérées dans

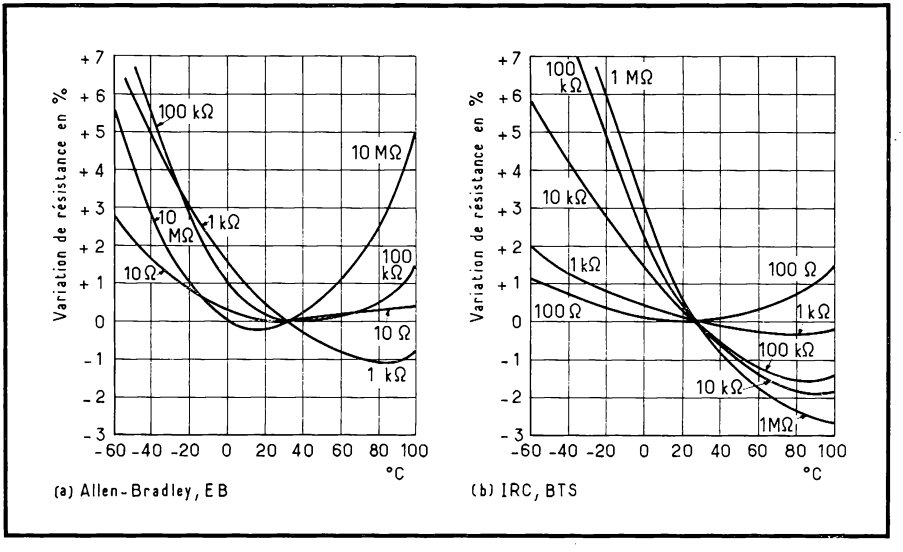


Fig. 2 - 19. — Variation du coefficient de température en fonction de la valeur ohmique et de la température ambiante pour les modèles Allen-Bradley **(EB) et** I.R.C. **(BTS).**

les circuits à haute impédance et à faible niveau : par exemple, en charge anodique d'un amplificateur à gain élevé.

COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Il est variable en fonction de la température, de la valeur ohmique et du mode de fabrication. Les courbes de la figure 2 - 19 se rapportent aux modèles *Allen Bradley* EB et *I.R.C.* BTS ; elles peuvent être prises comme des ordres de grandeur.

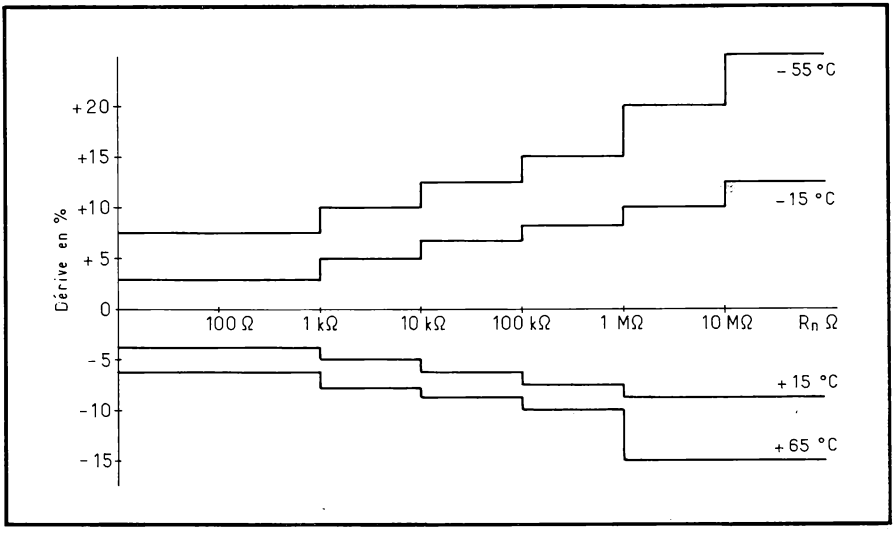


Fig. 2 - 20. — Dérive en % de la valeur de la résistance en fonction de la température et de la valeur nominale (C.C.T. 04-01).

DÉRIVE.

La dérive négative de la valeur ohmique des résistances agglomérées est importante. Elle est due surtout à la température du corps en fonctionnement. Pour une bonne fiabilité et une dérive acceptable il ne faut pas les utiliser à plus de 50 % de leur puissance nominale.

La figure 2 - 20 donne les courbes maximales de dérive en fonction de la température ambiante et de la valeur nominale admises par la spécification C.C.T. 04.01. On voit que pour les valeurs élevées la dérive aux températures extrêmes peut atteindre 20 %.

La firme *Allen Bradley* a publié des abaques permettant de prévoir la dérive en fonction de la charge de la résistance, de l'ambiance et de la durée de fonctionnement prévue.

Ces abaques ne sont valables que pour les modèles fabriqués par cette entreprise. Cependant, ils donnent un ordre de grandeur intéressant pour l'ensemble des résistances agglomérées. Ils ne tiennent pas compte des variations réversibles dues à l'humidité, ou aux caractéristiques de température et de tension. Les résistances de faible valeur et de valeur élevée varient moins que celles qui se rapprochent de la valeur critique, soit 270 kΩ. Ce sont des résistances de cette valeur qui ont été choisies pour l'établissement des abaques.

La température A est celle du métal sur lequel est soudé le fil de sortie de la résistance. Si sa masse est appréciable, il évacue correctement les calories par conduction et sa température est voisine de celle de l'ambiance. C'est le point froid.

La température B est celle relevée au centre de la surface de la résistance. C'est le point superficiel le plus chaud.

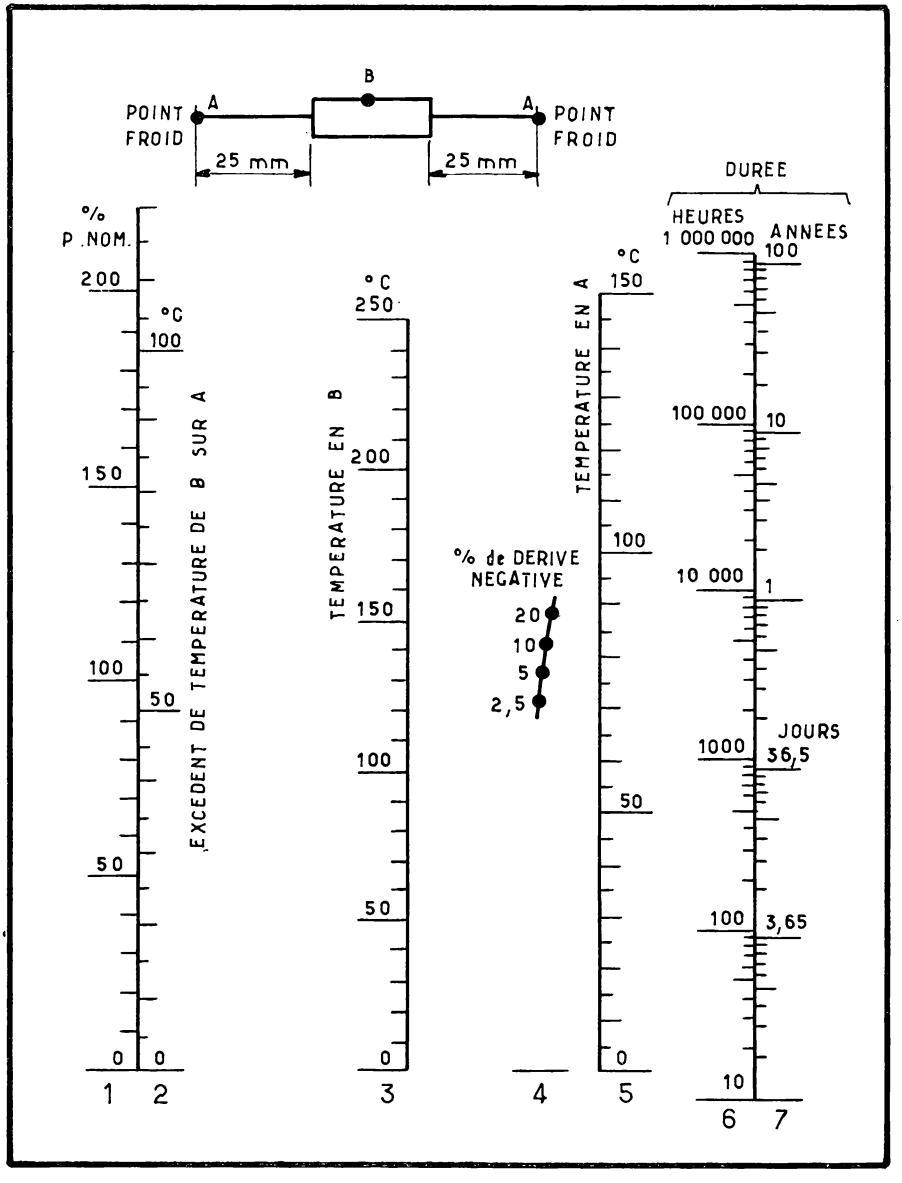


Fig. 2 - 21. — Abaque de dissipation des résistances en carbone aggloméré (Allen-Bradley, type EB, 1/2 W).

Les figures 2 - 21, 2 - 22 et 2 - 23 se rapportent respectivement aux modèles 1/2 W, 1 W et 2 W qui sont les plus courants. Ces abaques permettent de déterminer la durée de vie approximative d'une résistance dans des conditions d'utilisation connues, ou de prévoir la dérive au bout d'une certaine période.

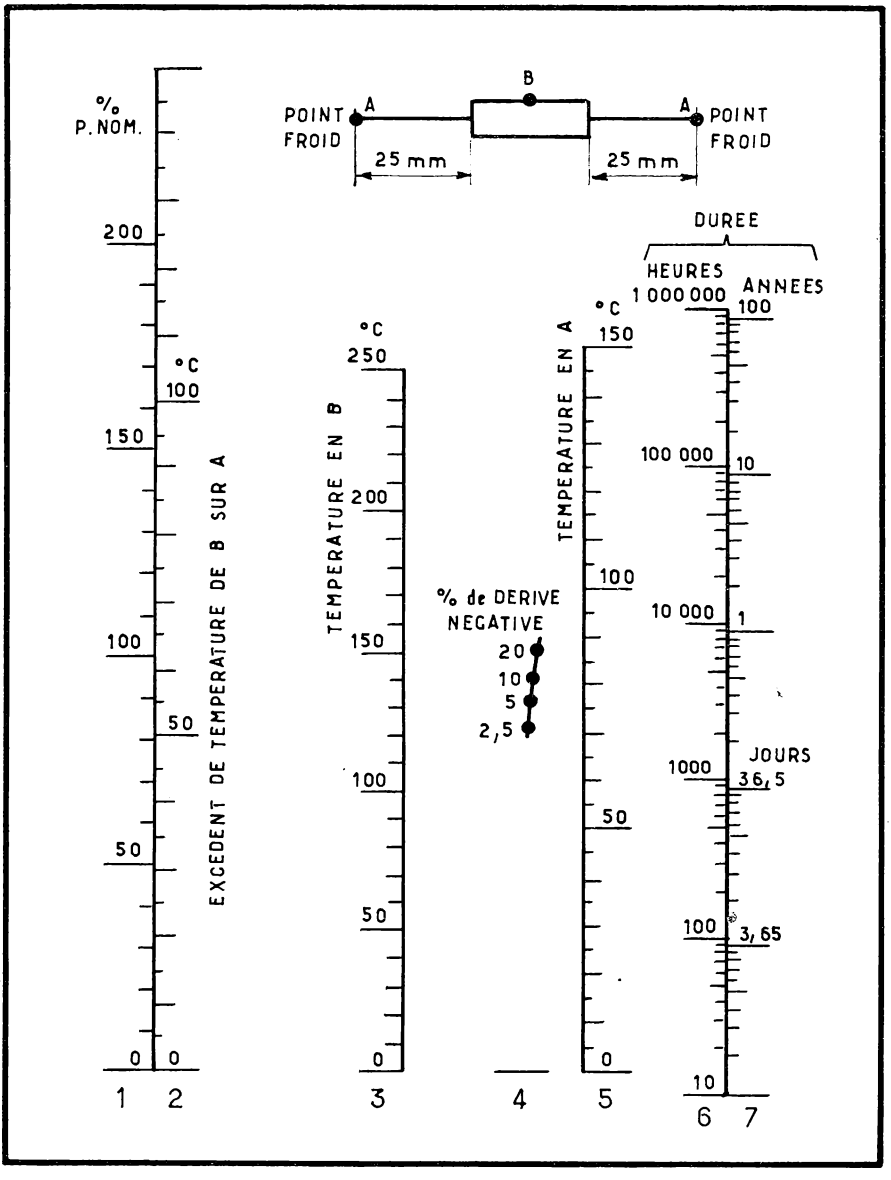


Fig. 2 - 22. —Abaque de dissipation des résistances en carbone aggloméré (Allen-Bradley, **type GB, 1 W).**

Soit à déterminer la durée de vie approximative d'une résistance type E B 1/2 W, utilisée à 50 % P_n, la température du point froid est de 50° C, la diminution de valeur admissible est de 5 %.

Tracer une droite depuis 50 échelle 1 (% P_n) jusqu'à 50 échelle 5 (tempé-

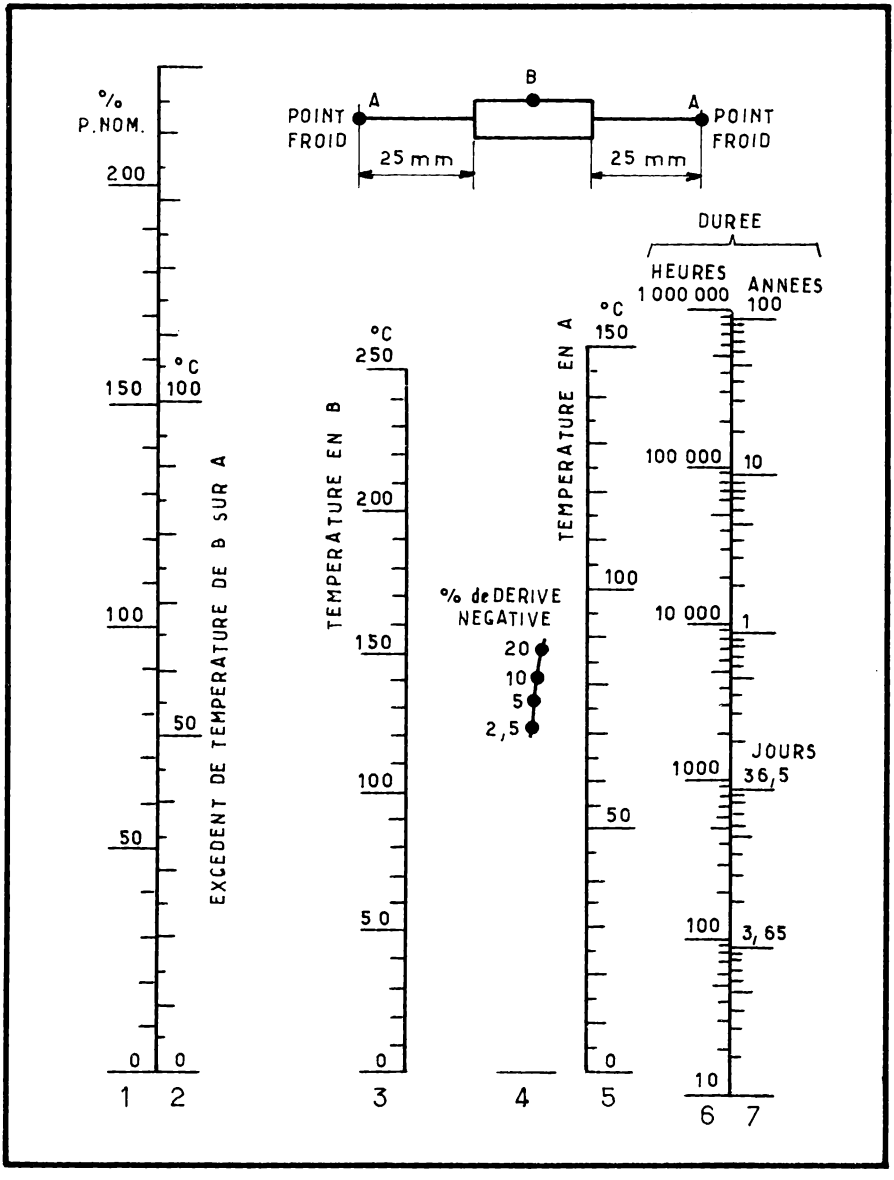


Fig. 2 - 23. — Abaque de dissipation des résistances en carbone aggloméré (Allen-Bradley, **type HB, 2 W).**

rature A). Cette droite coupe l'échelle 3 à 77° C (température B). Tracer une deuxième droite depuis 77° C (échelle 3) en la faisant passer par 5 % échelle 4 (dérive négative). Cette droite coupe l'échelle 6 à 110 000 heures (12 à 13 ans de l'échelle 7). C'est la durée de vie approximative recherchée.

On peut également déterminer le pourcentage de dérive après 40 000 heures de fonctionnement d'une résistance 1/2 W, utilisée à 100 % P_n et dont la température du point froid est de 40° C.

Tracer une droite depuis 100 sur l'échelle 1 jusqu'à 40 sur l'échelle 5. Cette droite coupe l'échelle 3 à 94° C, température de la résistance. Elever une deuxième droite depuis 94 sur l'échelle 3 jusqu'à 40 000 heures (échelle 6). Elle coupe l'échelle 4 à 5 %, c'est la dérive recherchée.

Enfin, il est possible de déterminer la température maximale admissible du point froid pour une résistance 1/2 W, utilisée à 100 % P_n pendant un an et dont la dérive maximale peut atteindre 7 %.

Tracer une droite depuis « 1 an » sur l'échelle 7 en la faisant passer par 7 % de l'échelle 4. Elle coupe l'échelle 3 à 124° C, température de la résistance. Tracer une deuxième droite depuis 124° C (échelle 3) jusqu'à 100 sur l'échelle 1. Elle coupe l'échelle 5 à 70° C qui est la température maximale admissible du point froid.

FIABILITÉ.

On peut conclure ces commentaires en assurant qu'une résistance agglomérée bien utilisée dans des circuits ne nécessitant pas une haute stabilité est fiable.

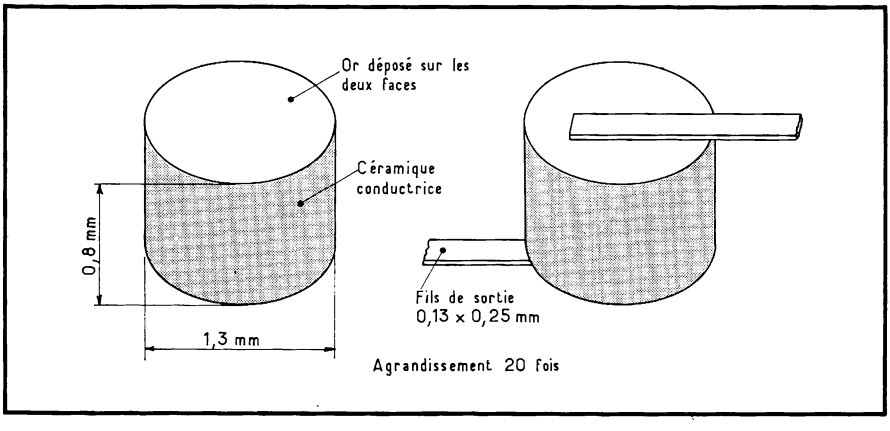


Fig. 2 - 24. — Résistance microminiature (Ceradot, **type C.T.S.**).

Elle est robuste, car le corps aggloméré est moins fragile qu'une couche mince. Son isolement donne en général satisfaction. La fixation des sorties noyées dans le corps de la résistance est particulièrement solide. Elle assure un service de longue durée ce qui est important pour les équipements professionnels qui fonctionnent sans interruption (9 000 heures par an).

Cependant, il ne faut pas les employer dans les circuits ne pouvant admettre une dérive de ± 10 %, ni dans les ponts diviseurs de tension de précision, ni dans les amplificateurs à fort gain.

3.8. — Les différents modèles fabriqués.

3.8.1. — *LES MODÈLES PROFESSIONNELS* (C.C.T. 04.01).

Gamme des valeurs : 10 Ω à 4,7 MΩ (série E 12).
Tension maximale aux bornes : 350 V pour 1/2 W ; 500 V pour 1 et 2 W.
Tolérances : ± 10 %, ± 5 %.

3.8.2. — *LES MODÈLES GRAND PUBLIC* (F.N.I.E. 016).

Gamme des valeurs : 10 Ω à 22 MΩ (séries E 6 et E 12).
Tension maximale aux bornes : 350 V pour 1/2 W ; 500 V pour 1 et 2 W.
Tolérances : ± 20 %, ± 10 %.

3.8.3. — *LES MODÈLES D'IMPORTATION.*

Ils offrent une gamme un peu plus étendue comportant les modèles 1/10 W et 1/4 W. Certains constructeurs ont à leur catalogue des modèles haute tension : 500 V pour 1/2 W et 1 000 V pour 1 W.

Aux U.S.A., *C T S Corporation* vient de mettre sur le marché la résistance micro miniature *Céradot* (fig. 2 - 24). C'est une résistance agglomérée cylindrique de 0,8 mm de hauteur et de 1,3 mm de diamètre. Les connexions sont soudées sur les faces opposées dorées. Ces résistances sont destinées à être encastrées dans des plaques de circuit imprimé spéciales. Gamme des valeurs : 50 Ω à 100 kΩ ; tolérances : ± 10 %, ± 5 % ; puissance 1/10 W.

LES RÉSISTANCES VARIABLES

1. — LES RÉSISTANCES VARIABLES BOBINÉES.

1.1. — Généralités

Les résistances variables sont communément appelées *potentiomètres* lorsqu'elles sont montées en parallèle dans le circuit (fig. 3 - 1), et *rhéostats* lorsqu'elles sont placées en série (fig. 3 - 2).

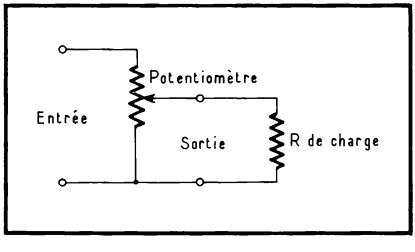


Fig. 3 - 1. — Résistance variable montée en potentiomètre.

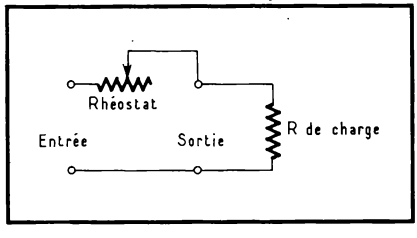


Fig. 3 - 2. — Résistance variable montée en rhéostat.

Il y a lieu de définir tout d'abord les abréviations et les termes normalisés employés pour les résistances variables. La figure 3 - 3 permet de définir les principaux paramètres :

R_n : résistance nominale.
R_t : résistance totale ($R_t = R_n +$ tolérance).
r_d : résiduelle de début de course.
r_f : résiduelle de fin de course.

A : borne de début de course, A′ avec interrupteur.
B : borne de fin de course.
C_d : curseur au début de la course.
C_f : curseur à la fin de la course.
P_n : dissipation nominale ; c'est la puissance maximale pouvant être dissipée sur la totalité de l'élément résistant en service continu, à la température nominale de service.
U_n : tension limite nominale aux bornes.
U_m : tension maximale de service ; pour les faibles valeurs de résistance $U_m = \sqrt{P_n.R_n}$. Au-delà de la résistance critique (R_c), elle est limitée par la tension limite nominale U_n.
U_o : tension maximale par rapport à la masse.
T_n : température nominale de service ; c'est la température ambiante à laquelle est définie la dissipation limite nominale.
T_m : température maximale de service ; c'est la température ambiante maximale à laquelle peut être utilisée la résistance variable sans dissipation de puissance ; elle correspond à la sévérité de l'essai de chaleur sèche et à la température maximale pouvant être atteinte par l'élément résistant.
Loi A : loi de variation linéaire.
Loi L : loi de variation non linéaire.

Les grandes catégories de résistances variables bobinées sont :

— LES RÉSISTANCES VARIABLES A FAIBLE DISSIPATION supportant une puissance inférieure ou égale à 10 W. Elles peuvent être étanches ou non, prévues pour le matériel grand public ou pour le matériel professionnel. La résistance nominale maximale atteint 10 kΩ pour les petits modèles et 100 kΩ pour les plus grands. Leur loi de variation est généralement linéaire. Ces composants

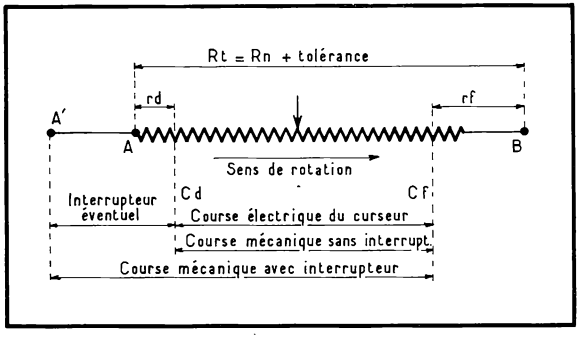


Fig. 3 - 3. — Définition des principaux paramètres d'une résistance variable.

n'ont pas un bon comportement en H.F. du fait de leur inductance élevée. Leur précision n'est pas très poussée, par contre leurs prix sont raisonnables.

— LES RÉSISTANCES VARIABLES A FORTE DISSIPATION atteignant une puissance de 1 kW. Leur valeur ohmique maximale ne dépasse pas 10 kΩ. Leur loi de variation peut être linéaire ou pseudo-logarithmique (potentiomètres gradués). Elles sont prévues uniquement pour le matériel professionnel. Leur utilisation en H.F. n'est pas recommandée. Ces composants sont très robustes et

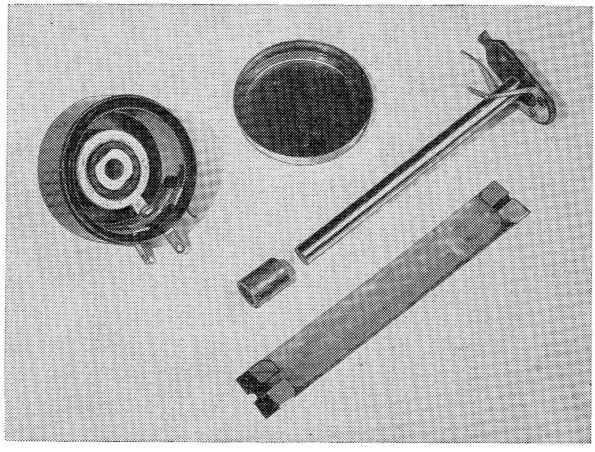


Fig. 3 - 4. — Détail de fabrication d'un potentiomètre bobiné de 5 W (Matera).

donnent une très bonne fiabilité, s'ils sont correctement employés. Il faut veiller tout particulièrement à ne pas les surcharger en début de course lors du montage en rhéostat.

— LES RÉSISTANCES VARIABLES DE PRÉCISION existant en de très nombreux modèles étudiés pour des applications particulières. Leur course peut s'effectuer en une ou plusieurs rotations. Les butées de fin de course peuvent être supprimées donnant une rotation continue. La loi de variation peut être linéaire, logarithmique, sinus-cosinus ou spéciale sur demande. Ces composants sont généralement étanches. Ils doivent être utilisés très en dessous de leurs caractéristiques maximales pour avoir une précision et une fiabilité extrêmes. Ils ne sont pas prévus pour un fonctionnement en H.F. Leur prix est très élevé et ils sont réservés bien entendu pour le matériel professionnel.

1.2. — Les résistances variables à faible dissipation.

Ces résistances ont un fil résistant constitué par un alliage nickel-cuivre pour les faibles valeurs ohmiques, et par un alliage nickel-chrome pour la majorité des appareils à construire. Le fil peut être livré nu, oxydé ou isolé à l'émail.

Etant donné qu'il est difficile de bobiner du fil sur un support toroïdal, on préfère pour cette fabrication utiliser une plaquette résistante séparée. Cette plaquette rectangulaire est bobinée à plat, puis elle est formée à chaud et placée dans le boîtier. Elle est constituée habituellement par une mince bande de bakélite ordinaire ou à âme de toile (céloron). Elle est ainsi plus résistante à l'humidité (fig. 3 - 4).

Le fil oxydé ou émaillé est bobiné à spires espacées sur la plaquette. Il est arrêté aux extrémités par des contacts en laiton argenté. Ce bobinage doit être très régulier, afin d'obtenir une bonne linéarité. La plaquette est recouverte de vernis pour immobiliser le fil, sauf à la partie supérieure où se fera le contact avec le curseur. Elle est cuite au four pendant 12 heures à 130° C, afin de sécher le vernis et stabiliser les caractéristiques de la bakélite et du fil.

Le fil utilisé dépend de la valeur du potentiomètre et de sa puissance. Ainsi, par exemple, un modèle 5 W est fabriqué pour toutes les valeurs entre 100 Ω et 50 kΩ. Pour la plus faible valeur le fil est du constantan (nickel-cuivre) de 220 μ. Au fur et à mesure que la valeur désirée augmente on diminue le diamètre du fil jusqu'à 80 μ pour 2 kΩ. Puis, pour 3 kΩ, on passe au nickel-chrome de 100 μ. On diminue à nouveau la section du fil jusqu'à 30 μ de diamètre pour 50 kΩ.

Les normes U.S.A. prescrivent la valeur du diamètre minimal du fil, afin d'avoir une bonne robustesse de l'élément résistant. On ne doit pas descendre au-dessous de 45 μ. Il est recommandé, si possible, de se tenir à une valeur minimale de 63 μ.

Puis, le fil est dénudé sur la tranche supérieure de la plaquette. Il faut user le vernis ou l'oxyde sans attaquer ou rayer le fil. On opère, soit avec une meule de feutre imbibée de potée d'émeri très fine, soit au moyen d'un microjet de talc ou de bicarbonate de soude sous forte pression.

Ensuite, la plaquette est cintrée à chaud et placée dans le boîtier en bakélite moulée. Ses extrémités sont reliées aux cosses de sortie. La cosse centrale aboutit au rail circulaire en laiton argenté fixé au fond du boîtier. Un canon en acier permet la fixation au châssis.

L'axe de commande en acier est fabriqué habituellement au diamètre de 6 mm, mais les normes françaises prévoient aussi les diamètres de 3 mm, 3,17 mm et 6,35 mm. Il reçoit à son extrémité une plaquette de bakélite ou tout autre matériau isolant qui supporte le curseur double en crysocal ou en maillechort. En effet, le curseur doit être isolé de l'axe puisque celui-ci est relié à la masse du châssis.

Le curseur, qui est double, appuie par une de ses extrémités sur la tranche supérieure de la plaquette résistante et par l'autre extrémité sur le rail circulaire fixé au fond du boîtier. La forme des curseurs, leur force d'application, la nature du métal et son traitement constituent un point très délicat dans la fabrication des potentiomètres.

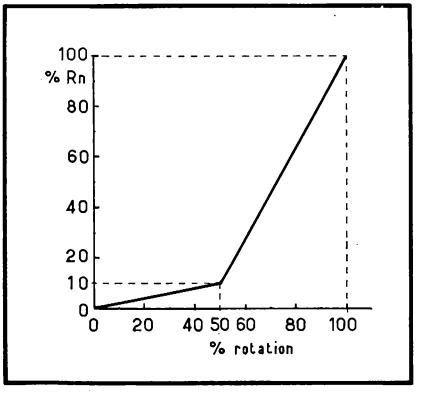


Fig. 3 - 5. — Courbe non linéaire pour les potentiomètres bobinés à faible dissipation (normes américaines MIL R 19 — 1956).

Enfin, le boîtier est fermé par un couvercle en tôle d'acier.

Ce mode de fabrication donne une courbe linéaire. La norme U.S.A. « M I L - R. 19 » prévoit également une courbe non linéaire pour ce type de matériel. A ce moment la plaquette rectangulaire reçoit deux fils de résistivité

différente (fig. 3 - 5). Le premier fil est peu résistant de façon à donner 10 % de R_n à 50 % de rotation. Puis un fil plus fin est bobiné sur la seconde moitié de la plaquette de façon à obtenir 90 % de R_n. Les deux fils sont soudés sur un collier intermédiaire. La courbe n'est pas vraiment logarithmique, mais formée de deux segments de droite.

Certains modèles sont étanches ; leur boîtier en bakélite ou en céramique est inséré dans une enveloppe métallique soudée. Les sorties sont effectuées au moyen de perles de verre et l'axe possède une gorge contenant un presse-étoupe assurant l'étanchéité (fig. 3 - 6). Ils peuvent être miniaturisés.

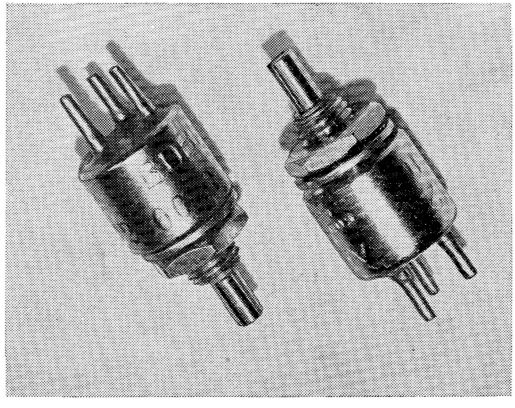


Fig. 3 - 6. — Potentiomètres miniatures bobinés, prévus pour montage sur circuit imprimé, et complètement étanches (M. C.B.-Véritable Alter, **Type Bobi 12, diamètre 12 mm, hauteur totale 30 mm**).

D'autres sont prévus pour être insérés dans des circuits imprimés. Les sorties sont constituées par des picots à l'écartement standard.

Quelques-uns ont un système de blocage d'axe afin d'éviter un déréglage intempestif. Ils ont un axe fendu pour réglage par tournevis.

Certains, enfin, ont un interrupteur combiné avec le potentiomètre et placé dans le couvercle arrière.

Les potentiomètres bobinés à faible dissipation pour matériel professionnel doivent satisfaire aux prescriptions de la spécification C.C.T. 05.02 (1961).

Les résistances nominales suivent la progression : 1 — 2,5 — 5 et ses multiples, selon la plage des valeurs des différents modèles. Il n'y a donc que trois valeurs par décade.

Les tolérances standard sont : ± 10 % et ± 5 %.

1.3. — Les résistances variables à forte dissipation.

1.3.1. — *LES MODÈLES A LOI DE VARIATION LINÉAIRE.*

La fabrication de ces types rappelle celle des résistances bobinées vitrifiées de forte puissance. En effet, toutes les matières utilisées doivent supporter des températures élevées.

Le fil résistant est généralement en nickel-chrome nu, car il supporte mieux les températures élevées. Il est utilisé, soit sous forme de ruban pour les faibles valeurs ohmiques, soit sous forme de fil de différents diamètres pour les valeurs élevées.

La surface de contact avec le curseur doit être proportionnée avec l'intensité admissible dans le circuit. Une résistance de contact appréciable entraînerait un échauffement anormal du fil et du curseur. C'est pourquoi, sur les modèles à très forte puissance on soude un contact en cuivre sur le fil ou sur le ruban à chacune des spires. Ce contact offre l'avantage d'être plan et d'avoir une surface suffisante.

Le support ne peut plus être en bakélite à cause de la température de fonctionnement prévue, il faut employer un corps réfractaire. Le plus courant est la céramique. Des études sont en cours pour la mise au point de supports en alumine ou en aluminium oxydé, car la dissipation thermique de ces matières est au moins vingt fois plus élevée que celle de la céramique. On pourrait ainsi obtenir des appareils de dimensions plus réduites à dissipation égale.

La figure 3 - 7 montre une gamme de potentiomètres de faible valeur ohmique et de différentes dissipations fabriqués par *Sfernice*.

Le support est constitué par un tore en céramique sur lequel est bobiné à spires espacées le fil ou le ruban au moyen d'une machine spéciale à navette. Les extrémités du bobinage sont soudées électriquement sur les cosses de sorties rivées sur le tore.

L'embase également en céramique est moulée séparément. Le tore bobiné est fixé sur l'embase par un émaillage à haute température qui protège également le fil, sauf bien entendu à l'endroit du contact.

Le curseur est en acier trempé. Il reçoit à son extrémité un contact autolubrifiant en graphite ou en carbo-bronze qui assure une faible résistance de contact. Une tresse de cuivre relie directement le contact à la rondelle de cuivre étamé qui frotte sur le rail circulaire. Le curseur en acier assure une pression suffisante entre le grain de carbo-bronze et le fil résistant mais il ne sert pratiquement pas au passage du courant.

Grâce à un ressort incorporé, la rondelle mobile est appliquée fortement sur une rondelle fixe, de mêmes dimensions et également en cuivre étamé. Celle-ci est reliée à la cosse de sortie centrale. Ainsi, ce contact permet le passage de fortes intensités sans risque d'échauffement.

Les potentiomètres ayant une masse moyenne sont fixés au châssis par un canon fileté et par un ergot de positionnement. Les modèles plus importants sont fixés au moyen de deux vis disposées symétriquement par rapport à l'axe.

Ces potentiomètres peuvent être accouplés mécaniquement et commandés simultanément par le même bouton tout en restant électriquement indépendants.

Les potentiomètres bobinés dont la dissipation est comprise entre 10 et 250 W doivent satisfaire aux prescriptions de la spécification C.C.T. 05.03 (1961). Il s'agit bien entendu de matériel professionnel.

Les résistances nominales suivent la progression 1 — 2,5 — 5, les tolérances sont ± 20 % pour R_n inférieur à 1 Ω et ± 10 % au-dessus.

L'échauffement maximal admissible est de 300° C pour une ambiance de 20° C. Les courbes renseignent sur la réduction de puissance nominale pour une ambiance plus élevée.

Dans les appareils à bobinage linéaire, l'intensité admissible dans chacune des spires est $I = \sqrt{W/R}$. Toutefois, dans le cas particulier d'un montage en rhéostat, le bobinage est parcouru par un courant décroissant en fonction du nombre de spires mises en circuit. Au début du bobinage on peut augmenter

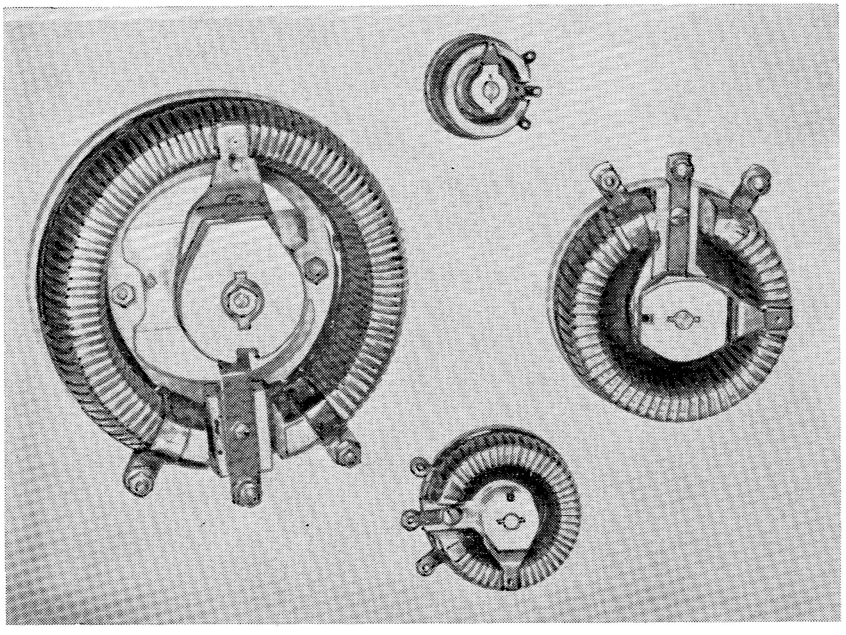


Fig. 3 - 7. — Potentiomètres de puissance et de faible valeur ohmique (Sfernice).

l'intensité admissible, car peu de spires s'échauffent sous le passage du courant, tandis que tout l'enroulement et son support participent au refroidissement. Pour un support en céramique on peut admettre une majoration du courant de 20 % au début de bobinage, et de 10 % à mi-course.

Les supports en alumine ou en aluminium oxydé permettent une majoration plus importante grâce à leur bonne conductibilité thermique.

En régime d'utilisation discontinue de courte durée, il est possible de dépasser notablement les courants normalement admissibles. Ainsi, le modèle 100 W supporte 200 W pendant une demi-heure et 2 700 W pendant 5 secondes.

Il existe des modèles, hors spécifications, qui atteignent 1 kW.

Pour être certain d'une très longue durée de service, il ne faut pas les charger à plus de 50 % de P_n, ni à plus de 70 % de l'intensité maximale pour le réglage le plus défavorable.

1.3.2. — *LES RHÉOSTATS GRADUÉS.*

Les potentiomètres linéaires sont intéressants lorsque l'intensité qui les traverse ne varie que dans des faibles limites en fonction de la portion du bobinage mis en circuit. C'est le cas du montage parallèle.

Dans un montage série ou rhéostatique, il n'en est pas de même. L'intensité en début de course est beaucoup plus importante qu'en fin de course. Si ce rapport est supérieur à 2, l'utilisateur a intérêt à choisir un bobinage à secteurs gradués.

Ces rhéostats sont constitués par plusieurs fils ou rubans de diamètre décroissant qui sont soudés électriquement ou par brasure bout à bout. Ainsi, lorsque le curseur est au début du bobinage et que l'intensité est maximale, le fil est le plus important. Inversement les dernières spires sont constituées avec le fil le plus fin, car à ce moment l'intensité est minimale. Il existe des rhéostats à 2, 3 ou 4 sections différentes. A ce moment la loi de variation ohmique n'est plus linéaire, car la résistance dépend de la section du fil. La courbe est formée de 2, 3 ou 4 portions de droite dont l'enveloppe est une courbe

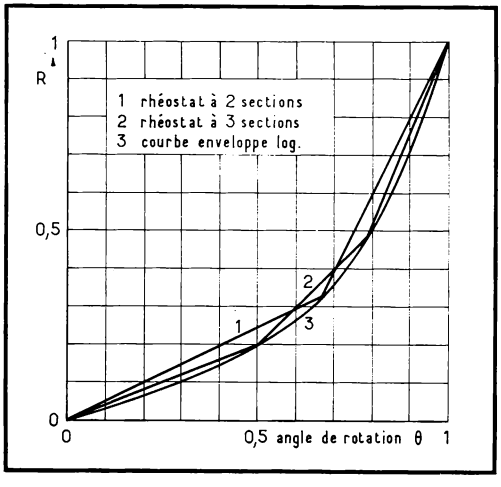


Fig. 3 - 8. — Courbes de rhéostat Sfernice gradué à 2 et à 3 sections.

logarithmique. On dit que la loi de variation est pseudo-logarithmique (fig. 3 - 8). On voit que plus il y a de sections, plus on se rapproche de la courbe logarithmique et plus le gain de volume est intéressant. La photographie de la figure 3 - 9 montre la réalisation d'un rhéostat gradué à 4 sections de 230 W fabriqué par *Sfernice*.

1.3.3. — *LES RHÉOSTATS TUBULAIRES.*

Ces rhéostats sont représentés dans la figure 3 - 10. Ils sont principalement utilisés dans les laboratoires. Ils sont constitués d'un ou deux tubes en céramique sur lesquels est bobinée la résistance. Un curseur vient s'appuyer sur la partie supérieure du bobinage.

Le fil est en nickel-cuivre (constantan) pour les faibles valeurs, et en nickel-chrome pour les valeurs élevées. Le fil oxydé est dénudé à la partie supérieure selon le procédé classique. Le curseur est en maillechort pour les faibles puissances et en graphite ou en carbo-bronze pour les intensités importantes.

Les flasques et, éventuellement, le carter de protection sont en fonderie d'aluminium vernie au four.

Le curseur peut être manœuvré par une manette en plastique, ou par une vis sans fin commandée par un bouton de grandes dimensions.

Les modèles jusqu'à 400 W (1 Ω à 20 kΩ) sont monotubes, au-dessus jusqu'à 1 kW (1 Ω à 50 kΩ) ils sont bi-tubes.

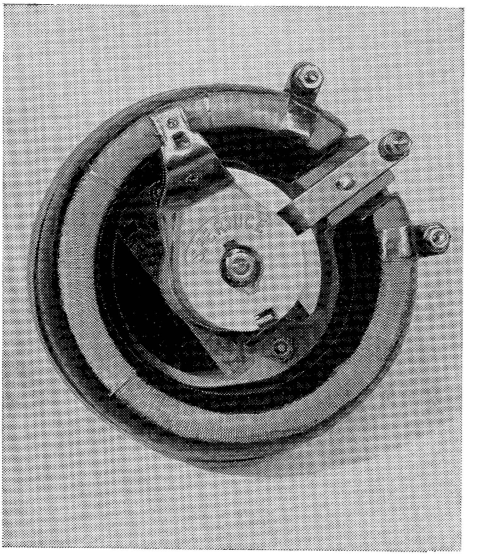
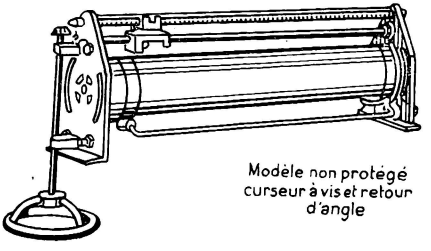
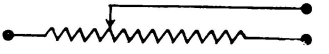
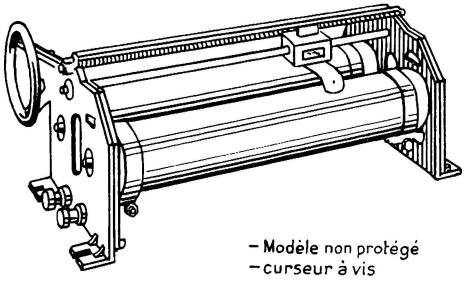


Fig. 3 - 9. — Rhéostat Sfernice **de 230 W à 4 secteurs.**







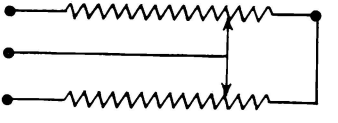


Fig. 3 - 10. — Vue schématique des rhéostats monotubes et bitubes (Condoint).

1.4. — Les résistances variables bobinées de précision.

1.4.1. — *FABRICATION.*

Il existe un grand nombre de modèles qui entrent dans les catégories suivantes :

— potentiomètres 1 tour avec butées ;

— potentiomètres 1 tour à rotation continue ;

(Ces deux modèles peuvent avoir une variation linéaire ou non : sinus-cosinus, portion de parabole, d'hyperbole ou de courbe exponentielle.)

— potentiomètres multitours (de 3 à 42) à variation linéaire ; de plus, plusieurs pistes peuvent être placées dans le même boîtier, ou plusieurs boîtiers peuvent être commandés par le même axe.

Ces composants ne sont plus de simples diviseurs de tension mais des transmetteurs électromécaniques dont la tension de sortie est une fonction désirée de la tension appliquée et de la position angulaire de l'axe de commande. Bien que le principe soit le même, il n'y a aucune commune mesure entre un potentiomètre bobiné ordinaire et un potentiomètre de précision. Ce dernier est beaucoup plus complexe et beaucoup plus coûteux.

La fabrication de tous les éléments doit être placée sous le signe de la précision la plus poussée.

FIL RÉSISTANT.

Afin d'avoir une bonne précision angulaire et une bonne linéarité, il faut que le diamètre du potentiomètre soit grand et que le fil soit le plus fin possible. Ces appareils étant largement dimensionnés on peut utiliser du fil très fin qui ne doit pas s'échauffer notablement. Pour les faibles valeurs ohmiques il vaut mieux adopter un alliage moins résistant plutôt que d'augmenter le diamètre du fil. C'est pourquoi certains fabricants emploient pour les faibles valeurs un alliage d'or, d'argent et de platine en fils de 10 μ à 70 μ. Ce fil est inoxydable et son coefficient de température est négligeable.

Pour les valeurs plus élevées on utilise successivement le nickel-cuivre (constantan) et le nickel-chrome.

Les fils résistants sont isolés à l'émail thermo-durcissable et ils sont bobinés à spires espacées afin d'éviter les crachements dus aux copeaux et à l'usure du fil. En effet, lorsqu'on bobine à spires jointives, l'opération d'usure de l'émail est plus difficile, seule la partie supérieure du fil peut être dénudée et les copeaux viennent obstruer les interstices entre les fils. Le curseur est soumis à ces irrégularités, ce qui augmente le bruit de rotation.

Si, au contraire, on espace légèrement les spires, les microjets usent l'émail sur la moitié de la surface du fil. Les copeaux sont facilement enlevés par le nettoyage à l'air comprimé et aux ultra-sons.

SUPPORT DE FIL.

Le fil peut être bobiné d'une façon classique sur une plaquette rectangulaire en bakélite insensible à l'humidité.

On utilise également des tores en matière plastique usinés avec précision. Le plexiglass et le téflon donnent de bons résultats.

Pour les potentiomètres hélicoïdaux à plusieurs tours, on cherche à réduire les dimensions du support, afin d'augmenter la définition. On choisit, soit un fil

oxydé ou émaillé de 2 à 3 mm de diamètre, soit une bande de bakélite longue, étroite et mince (fig. 3 - 11).

BOITIER.

C'est une pièce qui doit être usinée avec une précision de l'ordre du 1/100 mm. Elle est généralement en alliage léger à base d'aluminium, coulée et usinée. Au centre, on prévoit un roulement à billes miniature de précision afin que l'axe soit bien positionné et que le couple de rotation soit faible.

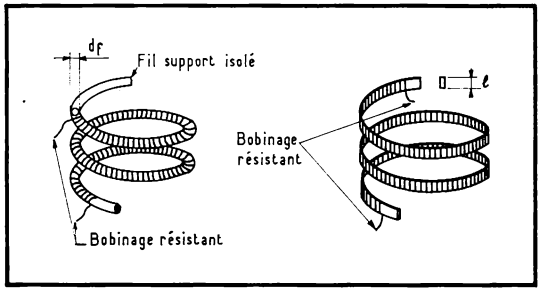


Fig. 3 - 11. — Support en fil isolé, et support sur bande de bakélite pour potentiomètres hélicoïdaux.

Les sorties sont effectuées, soit au travers d'une plaquette en stratifié, soit au moyen de perles de verre parfaitement étanches.

CURSEUR.

Le curseur est très fin et très léger, car il ne s'agit pas de capter une énergie appréciable. Ainsi, l'usure du fil n'est pas perceptible et le couple de rotation est réduit.

Le curseur est un fil de 70 à 100 μ en alliage précieux. On utilise le « neyoro » (or-paladium) avec des fils en alliage précieux, en argent ou en nickel-cuivre. Pour les fils en nickel-chrome on préfère le « paliney » (or-argent-paladium-cuivre).

La pression du curseur sur le fil est comprise entre 20 et 50 cN (centinewton). Pour certains potentiomètres hélicoïdaux, la pression du curseur peut descendre jusqu'à 1 cN.

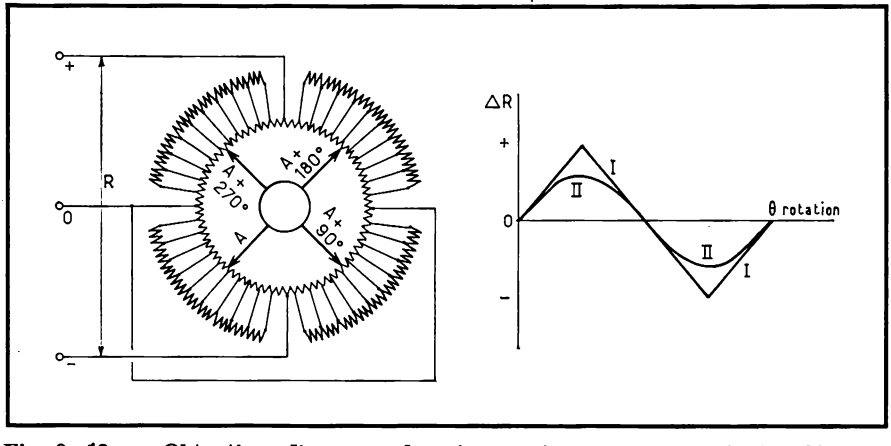


Fig. 3 - 12. — Obtention d'une courbe sinus-cosinus sur un potentiomètre de précision.

Le contact entre le curseur et le rail central en cuivre argenté est effectué par un fil en « neyoro ».

OBTENTION DES LOIS SPÉCIALES DE VARIATION.

En bobinant avec un fil unique les différents supports étudiés, on obtient une loi de variation linéaire.

Si la loi à obtenir est formée d'une succession de droites, il suffit de changer les caractéristiques du fil autant de fois qu'il y a de portions de droites. Ce cas a déjà été étudié précédemment.

Plus fréquemment, la loi à obtenir est une fonction mathématique représentée par une courbe. Elle s'obtient en partant d'une variation linéaire modifiée par des shunts placés sur une portion de la résistance.

C'est de cette façon qu'est obtenue, par exemple, une courbe sinus-cosinus (fig. 3 - 12). On part d'un potentiomètre à rotation continue, sans butée de fin de course. Le bobinage linéaire est réalisé sur une plaquette rectangulaire avec trois prises intermédiaires ; les deux extrémités sont réunies ensemble, ce qui donne quatre secteurs égaux. On monte sur l'axe quatre curseurs à 90° l'un par rapport à l'autre. Ils sont électriquement réunis ensemble et n'aboutissent à aucune sortie. Le potentiomètre est monté en pont comme indiqué sur la figure. A ce moment la variation de résistance en fonction de l'angle de rotation est donnée par la courbe I. Il faut passer de cette succession de droites à la courbe II qui est la sinusoïde demandée. Pour cela, on prévoit un certain

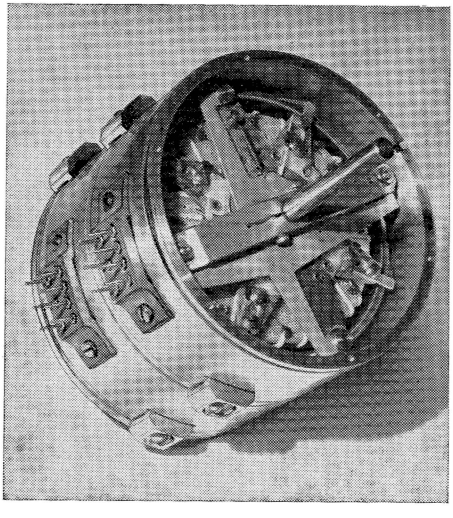


Fig. 3 - 13. — Potentiomètre sinus-cosinus (type Rotapot 122 F de M.C.B.-Véritable Alter).

nombre de prises sur le bobinage résistant de façon à calculer et à poser les shunts qui modifient la loi de variation. Le *Rotapot M.C.B. Véritable Alter* (fig. 3 - 13) comporte 72 prises, c'est-à-dire 18 par quadrant. On obtient ainsi la courbe II avec une précision de 0,5 %. On voit nettement les quatre curseurs et le bobinage ; les shunts sont au centre.

Sur les potentiomètres un peu moins précis, on utilise un autre procédé. La plaquette support de fil résistant n'est plus rectangulaire. Elle possède une forme permettant d'obtenir la loi demandée (fig. 3 - 14).

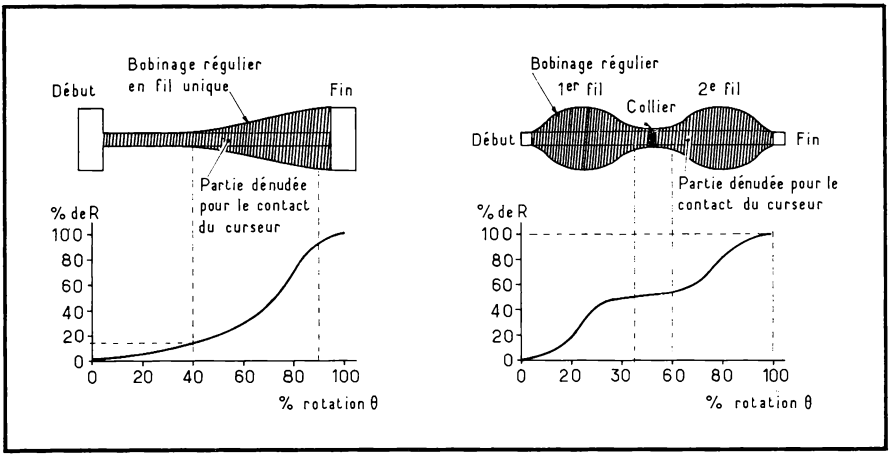


Fig. 3 - 14. — Courbes mathématiques obtenues par des plaquettes supports de fil de formes particulières.

On peut aussi prévoir des formes plus complexes avec deux ou trois changements de diamètre ou de nature de fil en cours de bobinage.

Dans ce procédé, le curseur ne peut plus frotter sur la partie supérieure de la plaquette dont la hauteur est irrégulière. Il s'applique sur une bande dénudée placée au milieu de sa hauteur.

1.4.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les potentiomètres bobinés de précision doivent satisfaire aux prescriptions de la spécification C.C.T. 05.04 (1963).

Valeurs : 1 — 2,5 — 5 et leurs multiples décimaux dans la plage couverte par les différents modèles. La tolérance sur la valeur nominale peut être ± 10 % ou ± 5 %. La précision sur la loi de variation, ou linéarité est généralement de ± 0,5 %. Les meilleurs atteignent ± 0,1 % et même ± 0,05 %.

Etant donné la grande variété des modèles il n'est pas possible de passer en revue leurs caractéristiques. Ils sont souvent fabriqués sur demande, afin de satisfaire à une application précise.

INFLUENCE DE LA CHARGE.

Le potentiomètre de précision ne peut pas être considéré seul, il faut tenir compte du circuit dans lequel il est inclus pour apprécier les erreurs de linéarité dues à la charge.

Soit le schéma très courant de la figure 3 - 15. La source fournit une tension stable E. La résistance du potentiomètre est R_P et la charge est R_L. A zéro pour cent de rotation, il n'y a pas d'erreur puisque R_L est en court-circuit. A 100 %, il n'y a pas d'erreur non plus puisque c'est la tension de la source qui est appliquée. Mais entre les deux extrémités il faut tenir compte du rapport $N = R_P/R_L$. La courbe d'erreur sur la linéarité atteint sa valeur maximale pour 67 % de rotation. Pour un rapport N de 1/5 l'erreur atteint 3 %, ce qui

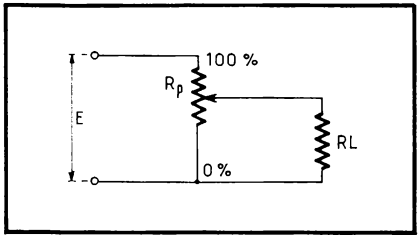


Fig. 3 - 15. — Schéma de montage classique d'un potentiomètre.

est beaucoup. Pour N = 1/100 l'erreur n'est plus que de 0,15 %, ce qui est acceptable. Il faut donc veiller à ce que la charge soit grande devant la valeur du potentiomètre afin de ne pas fausser la linéarité du potentiomètre de précision.

2. — LES RÉSISTANCES VARIABLES NON BOBINÉES.

2.1. — Généralités.

Les résistances variables non bobinées se classent en trois grandes catégories :

— *les résistances variables à couche de carbone ;* ce sont les plus répandues. Elles ne supportent qu'une faible dissipation, jusqu'à 2,5 W pour les modèles professionnels, et sont surtout employées dans des circuits diviseurs de tension, sans intensité appréciable donc de valeur ohmique élevée (jusqu'à 5 MΩ). Elles sont montées en potentiomètre. Leurs courbes peuvent être linéaires ou non. Leur boîtier peut éventuellement contenir un interrupteur. Fabriquées avec soin elles peuvent être fiables.

— *les résistances variables à piste moulée au carbone ;* elles supportent une puissance légèrement supérieure aux précédentes. Elles sont aussi plus robustes et peuvent fournir un service de longue durée. Elles sont utilisées sur le matériel professionnel.

— *les résistances variables à couche métallique ou à plastique conducteur ;* elles sont en plein développement. On peut envisager la fabrication de modèles à forte dissipation et de modèles de précision. Bien réalisées et bien utilisées, elles ont une très bonne fiabilité.

2.2. — Les résistances variables à couche de carbone.

2.2.1. — *FABRICATION.*

Leur fabrication est à rapprocher de celle des résistances à couche de carbone déposée.

Le mélange résistant est composé de carbone (noir de fumée), de graphite, de résine bakélite et de solvants. Ces constituants sont pesés avec précision, afin d'obtenir la valeur désirée. Ils sont mélangés très longuement avant d'être déposés sur une bande de bakélite servant de support. L'épaisseur de la couche est comprise entre 15 μ et 40 μ selon les modèles et la valeur ohmique à obtenir.

Un seul mélange appliqué sur le support donne un potentiomètre à courbe linéaire. Pour les potentiomètres à courbe logarithmique on dépose trois pro-

duits de résistivité différente en trois bandes parallèles sur le support. La découpe ultérieure des pistes est prévue de telle façon que l'enduit de faible résistivité corresponde au début de la piste, l'enduit à moyenne résistivité au milieu et celui à forte résistivité à la fin.

L'enduit est séché dans un four tunnel à infra-rouge vers 150° C.

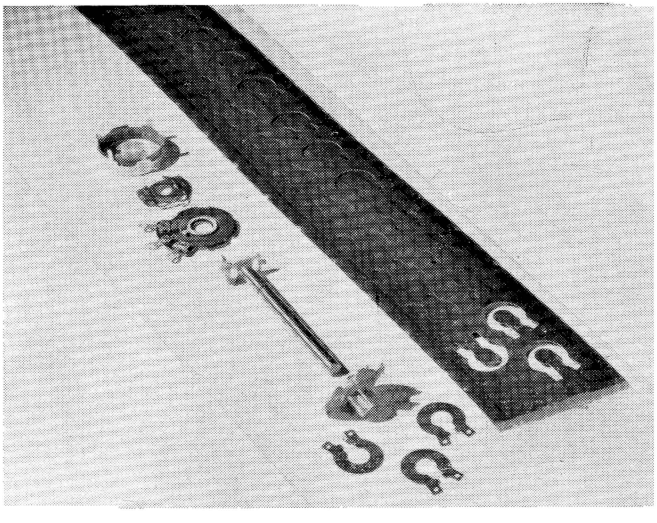
Afin d'avoir des résistances résiduelles faibles et un bon contact avec les sorties, on argente les extrémités de la piste. Puis les pistes sont découpées et vérifiées.

La piste terminée est montée sur une autre plaquette de bakélite découpée qui lui sert de support. Celle-ci reçoit les sorties en laiton cadmié et le rail central en laiton argenté ou nickelé.

Le boîtier peut être en bakélite moulée, en acier cadmié ou en zamac moulé. Le zamac est un alliage de 90 % de zinc et 10 % d'aluminium.

L'axe est en acier cadmié. Il comprend une gorge qui reçoit un clips afin de le positionner et de le fixer dans le potentiomètre. A son extrémité on fixe une pièce de bakélite qui reçoit le curseur double. Il faut, en effet, que le curseur soit isolé de l'axe. Enfin, il comporte un doigt pour l'entraînement de l'interrupteur éventuel.

Le curseur double appuie, d'une part sur la piste et d'autre part sur le rail central. Il est en maillechort ou en bronze au béryllium. Sa pression moyenne est de 110 cN sur les deux pistes. La forme, la matière, la découpe, le montage et le réglage du curseur sont des points très importants à résoudre pour obtenir une bonne fabrication sans mauvais contact, avec un bruit de fond faible et pour une longue durée. La surface réelle du contact sur la piste est d'environ 1 mm².



Fabrication des résistances variables à couche de carbone (Matéra). **On distingue la bande de bakélite recouverte de carbone avec la découpe des pistes.**

Ces éléments sont assemblés, réglés, vérifiés. Il faut contrôler : la valeur ohmique totale, les résiduelles, la loi de variation, l'isolement et le bruit de fond qui doit être au plus de 15 μ V/V.

A l'arrière, on peut éventuellement monter un interrupteur simple ou double qui est actionné par l'axe au début de sa course, sur un angle d'environ 30°. On prévoit un blindage entre l'interrupteur et la piste afin d'éviter les inductions parasites. Les contacts sont en laiton cadmié ou argenté et le ressort de commande est en acier.

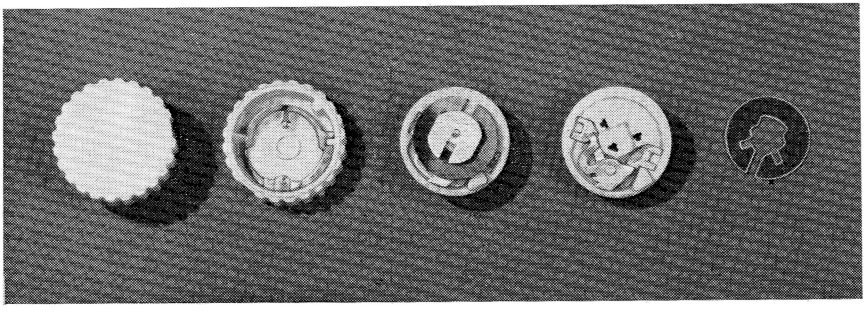


Fig. 3 - 16. — Le potentiomètre subminiature Matéra. **Il s'agit d'un modèle pour appareils transistorisés, comportant un interrupteur logé dans son bouton de commande. On distingue le bouton recto et verso avec le curseur, le socle avec la piste, et l'interrupteur et la pièce de bakélite d'isolement.**

Le principe de la fabrication est le même qu'il s'agisse d'un modèle professionnel ou d'un modèle d'usage courant. Ce n'est que le choix des matières premières, les procédés de fabrication et les tolérances plus serrées qui les différencient.

Certains sont étanches avec sorties par perles de verre et presse-étoupe sur l'axe. D'autres sont montés avec des matières non hygroscopiques ; le mylar peut remplacer la bakélite. D'autres, enfin, sont prévus avec une prise intermédiaire à une certaine valeur ohmique.

LES MODÈLES DE DIMENSIONS NORMALES ont un diamètre compris entre 25 et 40 mm. Ils sont étanches ou non, avec ou sans interrupteur, pour matériel professionnel ou pour matériel grand public.

LES MODÈLES MINIATURES ont un diamètre légèrement inférieur à 20 mm. Ils existent dans toutes les versions. Leur dissipation ne dépasse pas 1/2 W.

LES MODÈLES SUBMINIATURES pour appareils transistorisés sont généralement logés dans le bouton de commande (fig. 3 - 16). Leur diamètre est de 20 mm, leur épaisseur de 8 mm, leur masse est comprise entre 2 et 3 grammes, leur dissipation est comprise entre 0,1 et 0,2 W. Ils comportent généralement un interrupteur simple.

Le bouton contient, fixé à l'intérieur, le curseur avec ses deux points de contact. En tournant le bouton, on entraîne le curseur. Il se déplace devant la piste et la pièce métallique centrale reliée à la sortie correspondante. Cette pièce possède un ergot pour le déclenchement de l'interrupteur. Ces différents éléments sont montés sur le socle fixe. Sur la face extérieure du socle se trouvent cinq sorties. Les deux extrêmes correspondent à l'interrupteur et les trois

centrales au potentiomètre. C'est le socle qui est fixé à la plaquette de circuit imprimé de l'appareil.

LES MODÈLES AJUSTABLES sont prévus pour régler à la valeur voulue un potentiel dans un circuit à faible dissipation. Par exemple, ils servent à fixer le potentiel de la base des transistors.

La piste est déposée sur une plaquette, soit en bakélite, soit en céramique (fig. 3 - 17). Le curseur est ajustable, soit à la main, soit à l'aide d'un tournevis. Ces pièces sont très petites et sont généralement montées sur des circuits imprimés. Leur dissipation ne dépasse pas 0,1 W.

2.2.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les potentiomètres non bobinés au carbone doivent satisfaire aux normes et spécifications suivantes :

— *U.T.E. C 93.251* (1961) pour potentiomètres professionnels et grand public entre 0,05 et 1 W, loi A ou loi L.

— *C.C.T. 05.01* (1961) pour potentiomètres professionnels entre 0,1 et 2,5 W, loi A ou loi L, étanches ou non.

— *F.N.I.E. 019* (1961) pour potentiomètres grand public entre 0,05 et 1 W, loi A ou loi L, avec ou sans interrupteur.

Les valeurs nominales suivent la progression 1 — 2,5 — 5 et leurs multiples décimaux, tolérance recommandée ± 20 %. La résistance à mi-course doit être comprise entre 40 et 60 % de R_n pour la loi A (linéaire) et entre 8 et 12 % de R_n pour la loi L (non linéaire) en ce qui concerne le matériel professionnel.

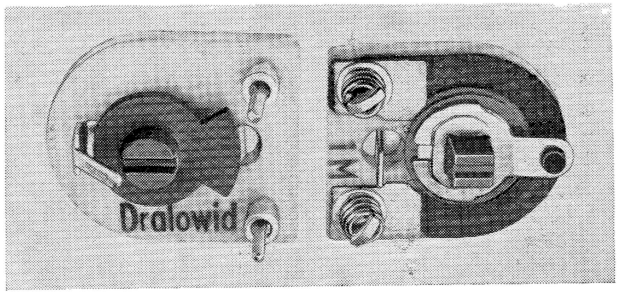


Fig. 3 - 17. — Résistance ajustable pour circuit imprimé montée sur céramique (Dralowid).

Pour les potentiomètres « grand public », on admet qu'à mi-course la résistance peut être comprise entre 7 et 15 % de R_n, toujours pour la loi L ; il n'y a pas de changement pour la loi A.

La valeur ohmique nominale peut être comprise entre 50 Ω et 5 MΩ.

BRUIT.

La valeur du bruit (piste et curseur) ainsi que le niveau de crachement ne sont pas portés sur les spécifications.

On a vu que les constructeurs se fixent une valeur maximale de 15 μ V/V.

Il existe trois bruits principaux pour ce type de potentiomètre :

— le bruit de piste exprimé en μ V/V (entre ses extrémités) ;

— le bruit de piste et de curseur sur une position donnée, il s'exprime en μ V/V (entre une extrémité et la cosse centrale) ;

— le bruit de déplacement (crachement) exprimé en mV.

On obtient les meilleurs résultats avec une piste dont la surface est lisse et régulière et dont le curseur a une surface de contact réelle d'environ 1 mm². Grâce à ces précautions on n'observe pas d'augmentation notable du bruit après 50 000 manœuvres sur les modèles professionnels.

COMPORTEMENT EN H.F.

Le mécanisme et le boîtier introduisent des paramètres difficiles à définir avec précision pour l'ensemble de la course. On constate généralement que leur comportement en H.F. n'est pas satisfaisant.

FIABILITÉ.

Pour obtenir une bonne fiabilité avec les modèles professionnels, il ne faut pas dépasser 50 % de la dissipation maximale dans la position du curseur la plus défavorable.

COURBES.

Les fabricants prévoient des courbes de variation plus nombreuses que celles figurant sur les normes. La figure 3 - 18 donne à titre d'exemple les courbes prévues par *Matéra* pour son modèle de 22 mm de diamètre.

2.3. — Les résistances variables à piste moulée.

2.3.1. — *FABRICATION.*

Leur fabrication est fondée sur le même principe que celui des résistances fixes agglomérées. La piste est formée d'un mélange de carbone, d'isolant et de liant qui est moulé en même temps que le support, le rail central et les sorties. On obtient ainsi un ensemble monobloc très robuste.

Il faut tout d'abord préparer des mélanges de produits ayant des résistivités correspondant aux valeurs ohmiques à fabriquer. Cette opération s'effectue avec les mêmes produits de base que pour les résistances agglomérées. Il faut préparer en plus des mélanges à faible résistivité pour le rail central et pour les zones de contact avec les sorties ; ils sont très riches en carbone.

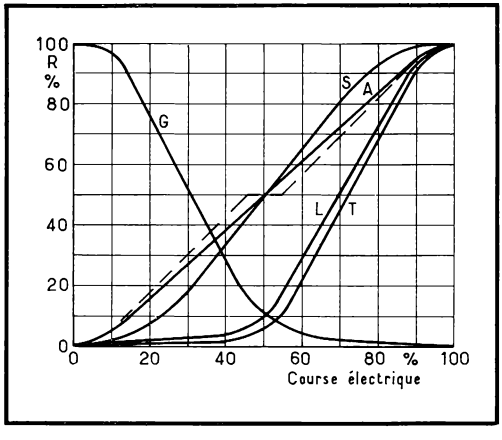


Fig. 3 - 18. — Courbes de variation pour les modèles de 22 mm de diamètre (Matéra).

Loi A : 40 à 60 % de R_t entre 47 et 53 % de la course.
Loi L : 7 à 15 % de R_t entre 47 et 53 % de la course.
Loi G : 7 à 15 % de R_t entre 47 et 53 % de la course.
Loi T : 2 à 5 % de R_t entre 40 et 46 % de la course.
Loi S : 7 à 15 % de R_t entre 22 et 38 % de la course, et 85 à 93 % de R_t entre 72 et 78 % de la course.

La machine à mouler reçoit et positionne les pièces métalliques, c'est-à-dire : le canon de fixation, le disque de refroidissement, les trois cosses de sortie et le rail central si celui-ci est métallique (fig. 3 - 19).

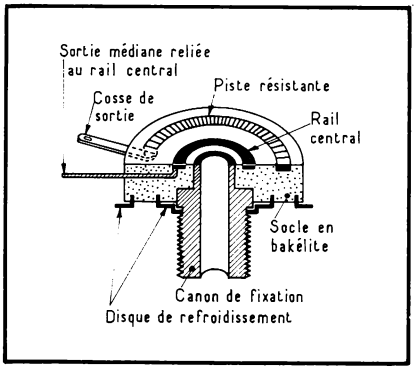


Fig. 3 - 19. — Détail de la piste moulée selon le procédé de fabrication Ohmic.

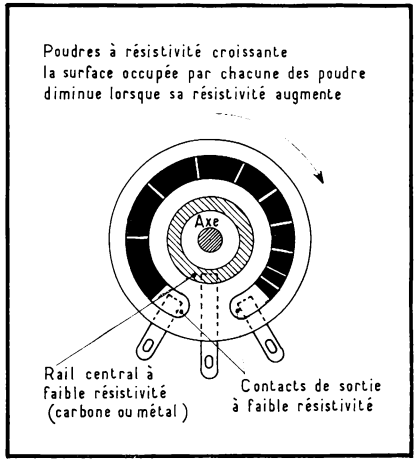


Fig. 3 - 20. — Potentiomètres à piste logarithmique moulée (Ohmic).

En effet, le rail central selon les fabrications peut être, soit métallique et enrobé dans le moulage, soit en carbone à faible résistivité moulé en même temps que la piste.

Elle possède trois réservoirs contenant : le premier de la poudre de bakélite, le second le mélange pour la piste, le troisième la poudre à faible résistivité pour le rail central, s'il est en carbone, et pour les sorties.

Plusieurs conduits amènent dans le moule les quantités strictement pesées des trois poudres aux moments et aux endroits précis où elles doivent se trouver. Le moulage s'effectue en plusieurs phases qui se succèdent très rapidement ne formant qu'une seule opération. On obtient la pièce définitive qui est constituée de la façon suivante. Le dessous est entièrement en bakélite isolante enrobant l'extrémité du canon de fixation, une partie des cosses de sortie, les bords du disque de refroidissement et le rail central s'il est métallique.

Le dessus comprend, en partant du centre, le trou de passage de l'axe, une partie de bakélite assurant l'isolement, le rail central en contact avec la sortie médiane, une partie de bakélite assurant l'isolement, la piste résistante de valeur voulue, dont les deux extrémités à faible résistivité sont en contact avec les cosses de sortie, et enfin une partie isolante en bakélite. La piste est alors à variation linéaire.

Pour la loi logarithmique, la fabrication est encore plus complexe, car il faut mouler côte à côte des poudres de résistivité croissante pour former la piste (fig. 3 - 20).

La pièce de base est ensuite polie très soigneusement de façon que la piste et le rail central assurent un très bon contact avec le curseur, et afin que le bruit soit faible.

Puis, elle est soumise à un traitement thermique de stabilisation, tout comme pour les résistances agglomérées.

On possède maintenant la base complète, il faut lui adjoindre l'axe en acier cadmié sur lequel on fixe l'ensemble curseur (fig. 3 - 21). Celui-ci comprend, une plaquette de bakélite découpée, un ressort en crysocale qui appuie sur le rail central et un plot de graphite qui est le curseur proprement dit.

Le plot de graphite appuie fortement sur la piste (450 à 500 cN). Il faut donc qu'elle soit très lisse et très dure afin d'éviter toute usure. Les risques de mauvais contact sont ainsi très fortement réduits. Il faut rapprocher cette pression élevée du curseur de celle prévue pour les potentiomètres à couche (110 cN) et de celle adoptée pour les potentiomètres bobinés de précision (1 cN).

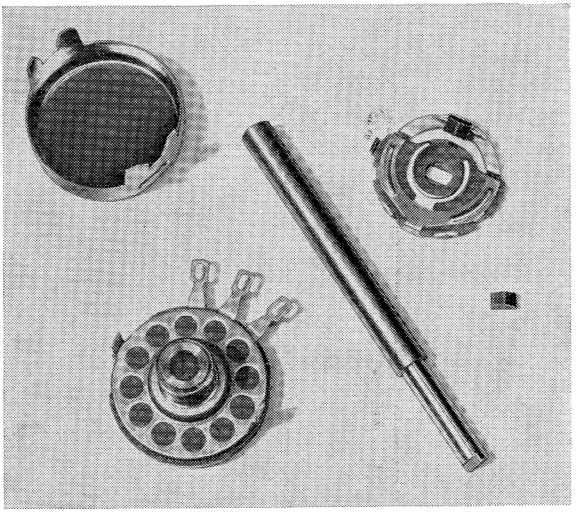


Fig. 3 - 21. — Pièces constituant le potentiomètre à piste moulée Ohmic. **On distingue la base complète vue par dessus montrant le disque de refroidissement, l'axe, le curseur, le plot de carbone et le couvercle du boîtier en acier inoxydable.**

Puis, le potentiomètre est fermé par un couvercle en acier inoxydable. L'ensemble est recouvert d'un vernis fongicide incolore.

POTENTIOMÈTRE MINIATURE.

Sur le même principe, *Ohmic* fabrique un potentiomètre miniature dont les éléments sont schématisés sur la figure 3 - 22 et photographiés sur la figure 3 - 23.

La disposition des éléments est inversée par rapport à la fabrication classique. C'est le curseur qui est fixé à la base du potentiomètre et la piste est présentée devant lui. Ainsi on gagne de la place puisque l'axe n'a plus à traverser la piste.

La piste moulée comprend donc : la piste résistante, un plot central de carbone à faible résistivité remplaçant le rail central, les trois sorties et un anneau de refroidissement moulé dans la bakélite.

L'axe traverse le canon et aboutit à un porte-curseur massif en bakélite. Dans son évidement central il reçoit un ressort de tension mécanique et le curseur triangulaire en graphite qui court-circuite la piste et le plot central.

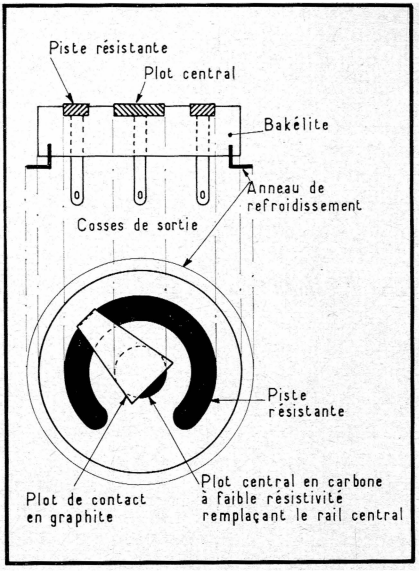


Fig. 3 - 22. — Vue schématique du potentiomètre moulé miniature Ohmic.

Le couvercle en acier inoxydable maintient les différents éléments en place. Il est aussi en contact avec l'anneau de refroidissement et permet de diriger les calories dissipées vers le châssis de l'appareil.

La piste est prévue en variation linéaire et en variation logarithmique.

2.3.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les potentiomètres à piste moulée satisfont à la spécification C.C.T. 05.01 pour le matériel professionnel. Leurs avantages sont les suivants :

— *Puissance dissipée* importante en fonction du volume grâce aux dispositions prises pour le refroidissement de la piste.

— Par suite du volume de la piste, il est possible d'admettre des *surcharges* momentanées.

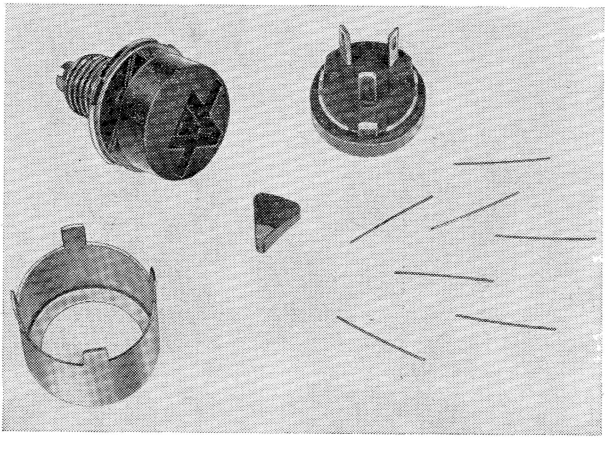


Fig. 3 - 23. — Potentiomètre moulé miniature Ohmic **(diamètre 12,7 mm). On distingue l'axe, le canon de fixation, le support du curseur; la piste complète avec ses trois sorties et l'anneau de refroidissement ; le plot de contact en graphite ; des ressorts assurant l'élasticité du plot de contact (un seul ressort est suffisant) ; le couvercle du boîtier maintenant les éléments ensemble.**

— La *durée de vie* est très grande puisque le frottement du plot de graphite augmente le poli de la piste sans l'user.

— L'élément résistant moulé est bien protégé de *l'humidité*.

— Les *coefficients de température et de tension* sont très faibles.

La plage des valeurs s'étend de 50 Ω à 5 MΩ variation linéaire ou variation logarithmique (minimum 100 Ω), tolérance normale ± 20 %.

La dissipation pour le modèle normal est de 2,25 W à 100 % pour la courbe linéaire et de 1 W à 100 % pour la courbe logarithmique. Le modèle miniature admet respectivement 0,5 W et 0,25 W.

La température maximale de la piste est de 125° C pour les deux modèles, ce qui permet de les utiliser à la puissance nominale jusqu'à une ambiance de 70° C.

2.4. — Les résistances variables à couche métallique ou à plastique conducteur.

2.4.1. — *LES RÉSISTANCES VARIABLES A COUCHE MÉTALLIQUE.*

On voit sur le marché étranger sortir les premiers potentiomètres de précision à couche métallique, obtenus par le dépôt d'un film d'oxyde d'étain sur un support de verre. La fabrication est dérivée de celle des résistances à couche métallique selon le procédé par photogravure. Le curseur est identique à celui des potentiomètres de précision. On a expérimenté avec succès les alliages : cuivre, argent, or et platine, iridium. Les sorties sont effectuées par un dépôt de métal précieux cuit au four.

Les variations d'épaisseur et de résistivité permettent de couvrir la plage normale des valeurs de résistance.

Les avantages de ce type de potentiomètre sont les suivants :

— tension de bruit de fond (piste et curseur) très faible : 0,01 μ V/V,

— linéarité, supérieure à 0,05 %,

— résolution, supérieure à 0,03 %,

— vitesse de rotation maximale : 2 000 tr/mn contre 300 tr/mn pour les modèles bobinés,

— coefficient de température voisin de zéro.

On étudie également des potentiomètres de puissance à film métallique car la dissipation peut atteindre 5 W par cm^2 de piste.

2.4.2. — *LES RÉSISTANCES VARIABLES A PLASTIQUE CONDUCTEUR.*

Ces potentiomètres de précision ont été étudiés et mis sur le marché par *Markite* aux U.S.A. Construits selon la technique des pistes moulées, ils sont formés d'un support en bakélite à charge minérale sur lequel est moulé un plastique conducteur de 1 mm de largeur sur 0,8 mm d'épaisseur.

Les sorties en laiton-béryllium sont moulées en même temps que la piste. Le curseur en alliage précieux est appliqué sur le plastique avec une pression de 100 cN, ce qui est plus élevé que pour la fabrication classique.

On obtient ainsi des potentiomètres dont la linéarité, la résolution et la durée de vie sont très intéressantes.

LES CONDENSATEURS FIXES

1. — GÉNÉRALITÉS.

1.1. — La capacité.

Deux corps conducteurs, séparés par un isolant, constituent un condensateur. Cette définition très générale montre que tout conducteur isolé possède une capacité par rapport aux autres conducteurs et par rapport à la masse. La valeur de cette capacité est :

$$C = 8{,}85.10^{-12} \frac{\varepsilon S}{e} \quad \text{(unités S.I.)}$$

C : exprimé en farad.

S : surface des conducteurs ou des armatures traversés par le champ et placés en regard, en m^2.

e : épaisseur du diélectrique qui sépare les deux conducteurs ou les deux armatures, en m.

ε : pouvoir spécifique inducteur, ou constante diélectrique ou permittivité de l'isolant par rapport au vide (vide $\varepsilon = 1$). On admet que pour l'air sec, à la pression atmosphérique $\varepsilon = 1$ tout comme pour le vide.

Un condensateur possède une capacité de 1 farad, lorsqu'il emmagasine 1 coulomb sous une différence de potentiel de 1 volt entre ses armatures.

Cette unité est beaucoup trop grande pour les applications pratiques. On utilise couramment :

le microfarad (μF) $= 10^{-6}$ F
le nanofarad (nF) $= 10^{-9}$ F
et le picofarad (nF) $= 10^{-12}$ F

La quantité d'énergie que peut emmagasiner un condensateur est :

$$W = \frac{C\ V^2}{2}$$

W, en joule.
C, en farad.
V, en volt.

On voit que pour un condensateur donné, la quantité d'énergie emmagasinée dépend beaucoup de la tension aux bornes. Cette tension est limitée par la nature et par l'épaisseur du diélectrique. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, un arc prend naissance entre les armatures et détruit l'isolant. Le condensateur est mis hors d'usage.

Si on branche des condensateurs en parallèle, la surface des armatures en regard devient la somme des électrodes des condensateurs :

$$C_t = C_1 + C_2 + \ldots\ldots C_n$$

Lorsque des condensateurs sont reliés en série, on observe que c'est l'épaisseur du diélectrique qui devient la somme des épaisseurs des diélectriques de chacun des condensateurs.

La capacité résultante est plus petite que celle du plus petit condensateur.

$$\frac{1}{C_t} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots\ldots \frac{1}{C_n}$$

Dans le cas de deux condensateurs :

$$C_n = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

1.2. — Le condensateur en continu.

On branche un condensateur aux bornes d'une source de courant continu et on insère un galvanomètre dans le circuit (fig. 4 - 1) ; on ferme l'interrupteur S ; on constate que le galvanomètre dévie très rapidement, atteint une valeur maximale, puis revient vers zéro très lentement. On dit que le condensateur se charge. La quantité d'électricité qu'il emmagasine est :

$$Q = C\ E$$

Q en coulomb, C en farad, E en volt.

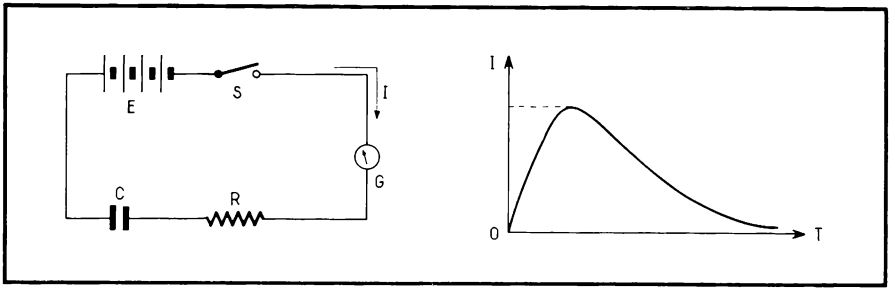


Fig. 4 - 1. — Fonctionnement d'un condensateur en courant continu.

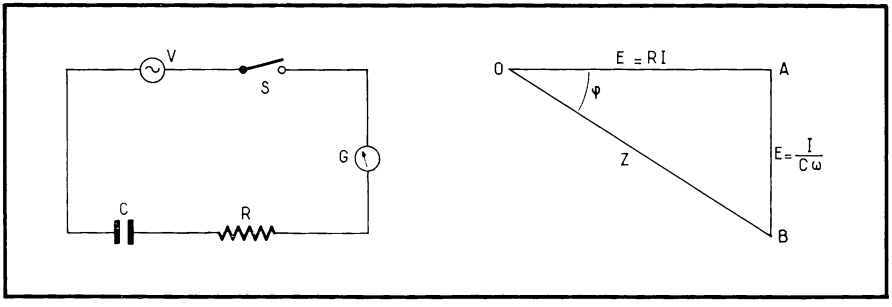


Fig. 4 - 2. — Fonctionnement d'un condensateur en courant alternatif.

On a vu précédemment que l'énergie récupérable est

$$W = \frac{C\,E^2}{2}$$

Théoriquement la charge complète a lieu en un temps infini, car la courbe de charge est une exponentielle. Pratiquement, la charge est considérée comme terminée à 1/1 000e près au bout de 6,9 T.

T étant la constante de temps, on aura $T = C\,R$

T en seconde ; C en farad ; R en ohm (c'est la résistance du circuit extérieur, car il ne peut y avoir de conducteurs sans résistance).

1.3. — Le condensateur en alternatif.

Si la source de courant de la figure précédente est remplacée par un alternateur (fig. 4 - 2), le condensateur va se charger et se décharger au rythme du courant alternatif. Le galvanomètre G va constamment indiquer un courant de charge ou de décharge du condensateur. Il y a un courant permanent dans le circuit. Les électrons oscillent sur place dans les conducteurs ou dans les armatures. Il est inexact de dire que le courant alternatif traverse un condensateur, car aucun électron ne peut franchir un diélectrique parfait.

Cependant ces charges demandent un certain temps pour s'établir ; il se produit donc un retard entre la tension aux bornes du condensateur et l'intensité qui parcourt le circuit. C'est ce qui différencie le comportement d'un condensateur et d'une résistance. De par la loi d'Ohm, lorsque la tension varie aux bornes d'une résistance, l'intensité varie immédiatement. On dit que la tension et l'intensité sont en phase. Aux bornes d'un condensateur l'intensité varie avant la tension. Un condensateur provoque un déphasage.

Sur le circuit de la figure 4 - 2, on trace un vecteur proportionnel à la tension aux bornes de la résistance du circuit : $E = I\,R$. Déphasé de 90° en avant, on trace le vecteur A B proportionnel à la tension réactive du condensateur :

$$E = \frac{I}{C\,\omega} \qquad \omega = 2\,\pi\,f \text{ (pulsation)}$$

puisque I est en avance sur V.

On réunit O et B par une droite. L'angle $\widehat{AOB}$ ou φ donne la valeur du déphasage du circuit.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\overline{AB}}{\overline{OA}} = - \frac{I}{C \omega I R} = \frac{1}{C \omega R}$$

L'impédance du circuit est :

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2 \omega^2}}$$

Si R est nul (impossible) : $Z = \frac{1}{C \omega}$

$\frac{1}{C \omega}$ s'exprime en ohm, c'est la résistance de capacité ou capacitance.

L'intensité qui paraît traverser le condensateur est :

$$I = E C \omega$$

La puissance moyenne du circuit est :

$$P = E_{eff} I_{eff} \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \qquad \sin \varphi = \frac{1}{Z C \omega}$$

1.4. — Les caractéristiques théoriques d'un condensateur.

Si un condensateur pouvait être parfait, il ne comporterait pas de résistance, le déphasage serait de 90° et il ne consommerait pas de puissance puisque cos 90° = 0. Mais cela est impossible à concevoir. Un condensateur réel peut être représenté par la figure 4 - 3.

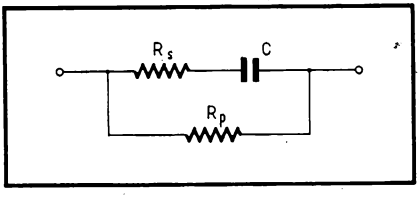


Fig. 4 - 3. — Schéma équivalent d'un condensateur réel.

La résistance série R_s est fonction de la résistance des connexions, des armatures et des caractéristiques du diélectrique. La résistance parallèle R_p représente les défauts d'isolement entre les armatures.

Sur la figure 4 - 4 on construit le graphique de ce condensateur. Le courant qui traverse réellement le condensateur est la résultante d'un courant watté en phase (pertes) et d'un courant déwatté dû à la capacité pure. Par la construction graphique expliquée précédemment on détermine l'angle de phase.

On appelle angle de pertes δ le complément de l'angle de phase. Plus cet angle est petit, meilleur est le condensateur : $\operatorname{tg} \delta = R_s C\omega$. Le facteur de puissance du condensateur est le cosinus de l'angle de phase ou le sinus de l'angle de pertes.

Lorsque les pertes sont faibles, comme c'est généralement le cas, on commet une erreur négligeable en admettant que le facteur de puissance, la tg δ et l'angle δ sont égaux. Dans ce cas : $R_s C\omega$ est le facteur de puissance. Il donne une mesure de la qualité du diélectrique à la fréquence de la mesure.

1.5. — La constante diélectrique.

C'est une des indications les plus importantes pour le choix d'un diélectrique. En pratique ε est compris entre 1 et 15 000. La constante diélectrique peut varier dans de grandes proportions en fonction de la fréquence, de la température et de la tension appliquée. Ce sont les diélectriques à constante diélectrique élevée qui sont les plus instables ; ils sont tout de même intéressants pour la fabrication de condensateurs miniatures. Les diélectriques à ε faible sont en général beaucoup plus stables.

Leur comportement impose des limitations d'emploi aux condensateurs correspondants.

1.6. — La résistance d'isolement.

Un condensateur doit avoir une résistance d'isolement élevée qui dépend en grande partie du diélectrique utilisé. On distingue : la résistivité superfi-

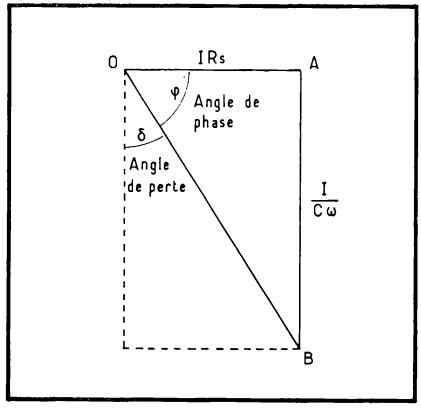


Fig. 4 - 4. — Angle de perte et angle de phase d'un condensateur.

cielle (en Ω) et la résistivité transversale ou en volume (en Ω.m). Ces valeurs diminuent lorsque la température et le degré hygrométrique augmentent.

Il faut également tenir compte du produit d'imprégnation, de l'enveloppe du condensateur et du mode de fabrication. Par exemple : un condensateur au papier imprégné à la cire voit sa résistance d'isolement diminuer de moitié lorsque la température augmente de 7° C. Ce même condensateur imprégné à l'huile minérale ne subit une baisse d'isolement de moitié que pour une élévation de température de 10° C.

La figure 4 - 5 donne quelques courbes d'isolement en fonction de la tem-

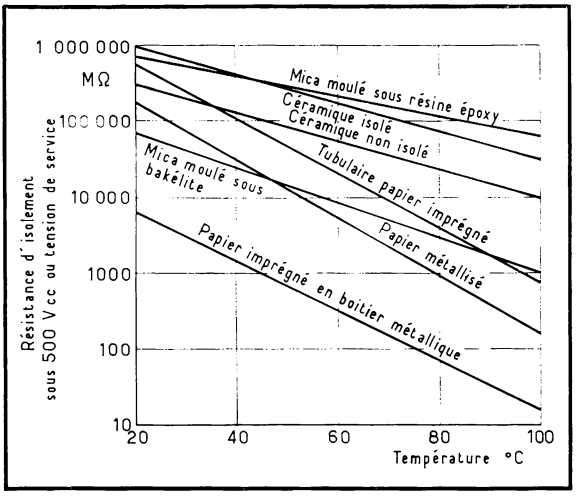


Fig. 4 - 5. — Variation de la résistance d'isolement en fonction de la température (Dummer).

pérature pour les diélectriques courants. Il n'est pas tenu compte de l'action de l'humidité sur ces courbes, si les condensateurs ne sont pas étanches.

1.7. — L'absorption diélectrique.

Un condensateur à diélectrique solide est chargé en courant continu, puis il est mis en court-circuit pendant quelques secondes. Il est laissé à circuit ouvert pendant un certain temps. On constate alors qu'une nouvelle charge plus ou moins importante paraît à la surface des armatures. On dit qu'une partie de la charge initiale a été absorbée par le diélectrique. L'absorption et la restitution de la charge par le diélectrique ne sont pas immédiates, mais demandent un certain temps selon sa nature (d'une fraction de seconde à quelques heures).

Ce phénomène conduit pratiquement à une diminution de capacité à mesure que la fréquence augmente. Il provoque des retards dans certains montages à impulsions et dans des circuits à charge ou à décharge très rapide.

1.8. — Le courant de fuite et la constante de temps.

Lorsqu'un condensateur a été chargé en courant continu, les pertes occasionnées par le courant de fuite empêchent la conservation indéfinie de la charge.

On a vu que le temps pendant lequel la charge diminue dans le rapport 1/e ou 36,8 % est égal au produit R C, où R est la résistance de fuite en ohms et C la capacité en farad (c'est la constante de temps exprimée en seconde).

Les condensateurs électrolytiques ont une constante de temps de quelques secondes, les condensateurs à la céramique du groupe II à ε élevé tiennent la charge quelques minutes, tandis que les condensateurs au papier, au mica, à la céramique du groupe I ont une constante de temps de quelques heures et les condensateurs à film plastique de plusieurs jours.

1.9. — La rigidité diélectrique.

La rigidité diélectrique d'une matière est déterminée par la tension pour laquelle un perçage de l'isolant se produit.

La tension disruptive en kilovolt par unité de longueur dépend de l'épaisseur du diélectrique, de la température, de l'humidité, de la forme d'onde de la tension d'essai, de sa fréquence et de la méthode de mesure.

La rigidité diélectrique d'un isolant diminue toujours lorsque la température, l'humidité et la fréquence augmentent.

1.10. — L'influence de la fréquence sur le comportement des diélectriques.

Aux très basses fréquences, comme aux très hautes fréquences, les pertes augmentent et imposent des limitations à l'emploi des diélectriques.

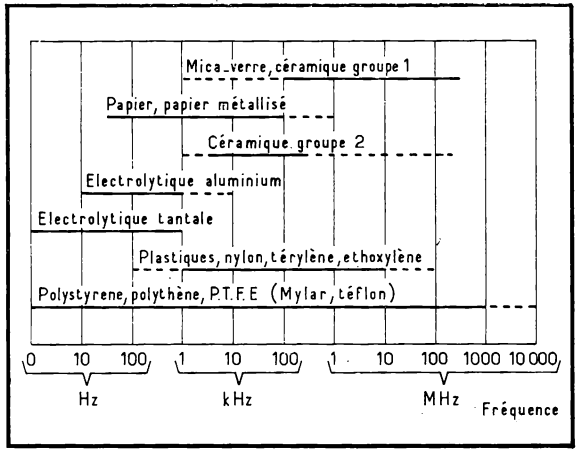


Fig. 4 - 6. — Gamme de fréquences d'emploi des principaux diélectriques.

La figure 4 - 6 donne la gamme des fréquences d'emploi des principaux diélectriques. Les traits continus correspondent aux fabrications classiques, les pontillés indiquent, soit des fabrications spéciales, soit des progrès en cours.

1.11. — Les spécifications officielles sur les condensateurs.

Elles sont indiquées pour chaque catégorie de condensateurs avec éventuellement leur code de marquage.

Les essais généraux à faire subir aux condensateurs sont les mêmes que ceux indiqués pour les résistances.

1.12 — Les différents types de condensateurs.

Le tableau synoptique ci-après donne un résumé des caractéristiques principales des différents types de condensateurs.

Type de condensateur	Plage des fréquences limites		Angle de pertes	Constante diélectrique	Utilisations		Tolérances standard	Utilisations
	Mini.	Maxi.			Profes.	Grand public		
Condensateurs au papier..	C.C.	1 MHz	0,01 à 0,03	4,5	×	×	± 20 % ± 10 %	découplage B.F. liaison B.F. filtres, facteur de puissance, économiques.
Papier métallisé	C.C.	100 MHz	0,03 à 0,05	4	×	×	± 20 %	découplage miniature, liaison B.F. anti-parasite, plus coûteux.
Plastique	C.C.	10 000 MHz	0,0005	2 à 3	×	×	± 5 % ± 1 %	tous usages. accord des circuits, très intéressants.
Mica	C.C.	10 000 MHz	0,0005	6,5 à 7	×	×	± 1 %	accord des circuits H.F. ligne à retard.
Verre	200 Hz	10 000 MHz	0,001	4 à 6,5	×		± 1 %	remplace le mica dans toutes les applications H.F.
Céramique : Groupe I ..	1 MHz	5 000 MHz	0,001	5,4 à 20	×	×	± 5 % ± 1 %	circuits H. F. de puissance. accord et dérive H.F.
Groupe II .	1 MHz	1 000 MHz	0,01	500 à 15 000	×	×	± 20 %	découplage H.F.
Electrolytique à l'aluminium	C.C.	1 kHz	0,05	9	×	×	— 10 + 50 %	découplage, filtrage, liaison transistors.
Electrolytique au tantale.	C.C.	1 kHz	0,05	11	×		— 20 + 50 %	découplage, filtrage, circuits transistorisés.

Résumé des caractéristiques principales des différents types de condensateurs.

2. — LES CONDENSATEURS AU PAPIER.

2.1. — Le papier.

Le papier est un des plus anciens diélectriques utilisés pour la fabrication des condensateurs.

A l'origine, le papier spécial était fabriqué à l'aide de pâtes de lin blanchies. Mais, du fait de leur faible constante diélectrique, elles ont été progressivement remplacées par des pâtes de bois à la soude qui constituent actuellement la matière première courante. Elles proviennent de Suède, de Finlande et du Canada.

La pâte de bois est broyée très longuement et très complètement de façon à former des fibres très fines en suspension dans l'eau.

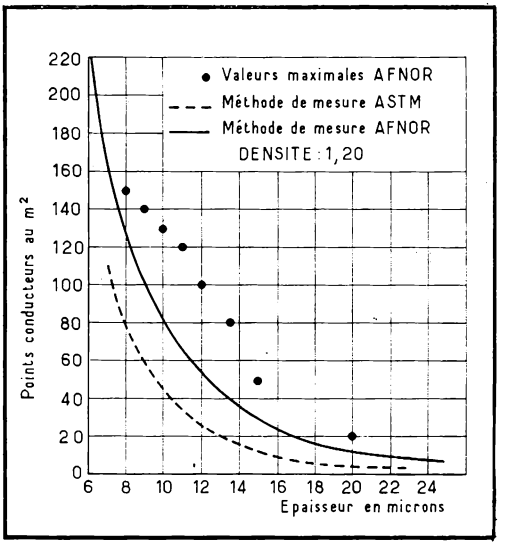


Fig. 4 - 7. — Nombre de points conducteurs au mètre carré en fonction de l'épaisseur du papier. Valeurs maximales AFNOR et valeurs garanties par les papeteries Bolloré, selon deux méthodes de mesure (ASTM et AFNOR).

La pâte et l'eau ne doivent pas contenir d'impuretés afin qu'il n'y ait pas de défauts dans le papier et que ses caractéristiques soient constantes.

La machine de fabrication reçoit la solution aqueuse contenant approximativement 0,3 % de matières sèches. Par égouttages, aspirations successives et passage entre des rouleaux chauffés la feuille de papier prend naissance.

Il ne contient ni charges comme le papier journal, le papier bible ou le papier à cigarettes, ni colles ou produits collants comme le papier écriture ou le papier photographique, il est le plus pur possible. L'analyse chimique décèle seulement des traces de silice, de fer, d'alumine, de calcium et de cuivre. Sa densité est comprise entre 0,9 et 1,25 selon les types de condensateurs à construire.

Pour les condensateurs destinés aux applications électroniques, on préfère un papier de densité comprise entre 1 et 1,25 (épaisseur 3 à 30 μ), tandis que pour les condensateurs haute tension des réseaux industriels, on choisit un papier de densité plus faible : 0,9 à 1 (épaisseur 10 à 25 μ).

Lors de la fabrication du papier, la solution aqueuse a été filtrée sur la toile métallique de la machine. Malgré toutes les précautions prises, des particules métalliques sont arrachées à la toile et sont emprisonnées dans le papier donnant des « points conducteurs ».

La figure 4 - 7 montre le nombre de points conducteurs au m², en fonction de l'épaisseur du papier.

La figure 4 - 8 donne la rigidité diélectrique en fonction de l'épaisseur et de la densité du papier. On observe que, *proportionnellement*, un papier de faible épaisseur supporte une tension relative plus importante qu'un papier plus épais. Cette particularité est observée pour un certain nombre de diélectriques.

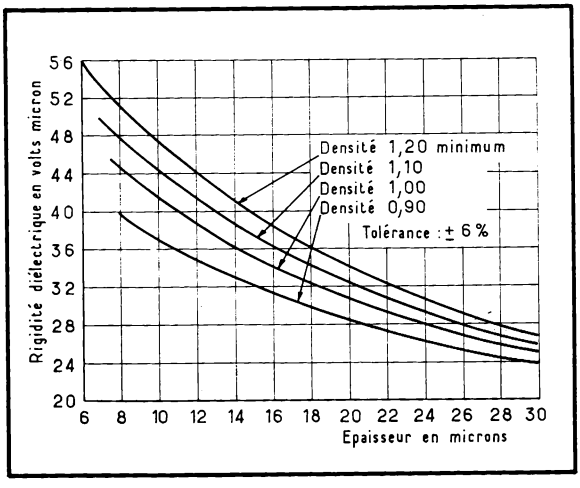


Fig. 4 - 8. — Rigidité diélectrique en fonction de l'épaisseur et de la densité du papier (Papeteries Bolloré).

Le nombre de couches de papier utilisées pour la fabrication d'un condensateur est à préciser. En effet, un diélectrique constitué, par exemple, par trois couches de papier de 8 μ possède une rigidité supérieure au diélectrique de même épaisseur, mais constitué par deux couches de papier de 12 μ. On peut admettre que la rigidité croît sensiblement comme le carré du nombre de couches.

Le papier n'est jamais utilisé seul, mais toujours imprégné par des cires ou des huiles minérales ou par des huiles synthétiques.

La constante diélectrique à prendre en considération est celle donnée par le papier imprégné.

2.2. — La fabrication.

2.2.1. — *BOBINAGE.*

Un condensateur au papier est constitué par le bobinage de deux feuilles d'aluminium pur séparées par plusieurs feuilles de papier.

L'aluminium doit être très pur (99,99 %) afin qu'il ne s'oxyde pas pendant la fabrication. Son épaisseur est comprise entre 6 et 10 μ pour les condensateurs tubulaires, et entre 60 et 100 μ pour les condensateurs en boîtiers de forte capacité et pour tensions élevées.

L'atelier doit être très propre, maintenu à une température et à un degré hygrométrique constants. Les bandes de papier et d'aluminium doivent être manipulées avec des gants et éviter tout contact salissant. C'est grâce à ces précautions que l'on obtient des condensateurs de qualité.

Les rouleaux sont montés sur une machine à bobiner représentée schématiquement par la figure 4 - 9. Cette machine comprend :

— 2 bobines d'aluminium pour constituer les électrodes,

— au moins 4 bobines de papier, car il est indispensable de prévoir deux épaisseurs entre chaque électrode.

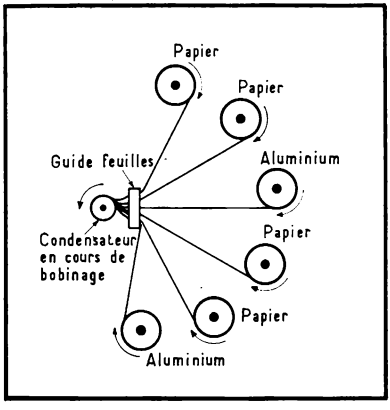


Fig. 4 - 9. — Représentation schématique d'une machine à bobiner les condensateurs.

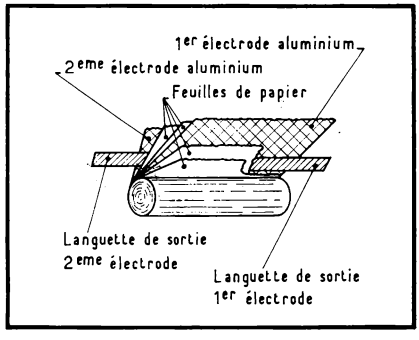


Fig. 4 - 10 (Ci-contre). — Sorties d'un condensateur au papier par des languettes intercalées dans le bobinage.

En superposant deux feuilles, les défauts et les points conducteurs de l'une sont masqués par l'autre et inversement. Deux épaisseurs de papier permettent de fabriquer des condensateurs jusqu'à 250 V de tension de service. Au-dessus, il faut augmenter le nombre de feuilles jusqu'à 6 pour les tensions les plus élevées. Une machine comprend la possibilité de bobiner 14 feuilles à la fois (12 papier et 2 aluminium).

Pour la détermination de l'épaisseur du diélectrique on se base sur une tension de service comprise entre 15 et 25 V/μ.

Il ne faut pas dépasser 3 000 V par élément. Pour les tensions supérieures il est préférable de placer plusieurs éléments en série dans le même boîtier.

Le bobinage doit être très serré, afin qu'il ne reste pas de bulles d'air entre les électrodes, constituant un point faible.

Les sorties sont réalisées selon trois procédés :

a) Des languettes d'aluminium ou de cuivre étamé sont introduites en cours de bobinage permettant de « sortir » les électrodes (fig. 4 - 10). Ce procédé est simple, mais il donne des condensateurs dont la résistance série et l'inductance sont appréciables, et qui ne peuvent pas être employés en H.F. ; de plus, le contact entre l'électrode et la languette risque de s'oxyder. Si le condensateur est monté dans un circuit à tension faible ou nulle, l'oxyde provoque l'isolement de la sortie, donc la coupure du condensateur.

Si la tension aux bornes est plus élevée, elle peut percer la couche d'oxyde et rétablir la sortie.

Un condensateur fabriqué de cette façon ne peut être utilisé que pour le découplage de tensions d'alimentation en B.F.

b) Les languettes ont une plus grande surface et elles sont soudées aux électrodes et aux fils de sortie. Un tel condensateur se comporte mieux, mais la difficulté consiste à souder le cuivre sur l'aluminium.

c) Les feuilles de papier sont un peu moins larges que les feuilles d'aluminium qui sont décalées, l'une vers la droite, l'autre vers la gauche (fig. 4 - 11). Les sorties sont soudées à une coupelle ou à un disque de cuivre étamé qu'il suffit de souder aux électrodes qui dépassent légèrement de chaque côté du bobinage. Le condensateur est vraiment non inductif et sa résistance série est faible. Il peut être employé dans tous les circuits, même en H.F.

2.2.2. — *IMPRÉGNATION.*

Le bobinage est monté dans son boîtier qui reste ouvert, puis on procède à l'imprégnation.

Il faut tout d'abord assécher complètement les condensateurs en étuve à 100° C pendant au moins 24 heures.

Puis, ils sont placés dans la cuve d'imprégnation pendant 48 heures. Le degré de vide atteint 10 μ de mercure.

Le produit est chauffé vers 125° C et dégazé avant d'être introduit dans la cuve. Il remplit tous les vides du papier et du bobinage laissés libres par l'évaporation de l'humidité.

Les condensateurs « grand public » sont imprégnés à la cire minérale permettant une température maximale de fonctionnement de 70° C.

Les condensateurs professionnels étanches sont imprégnés, soit à l'huile minérale (+ 100° C), soit à l'huile synthétique (+ 125° C).

Dès leur sortie de la cuve les boîtiers sont scellés à chaud.

2.2.3. — *FINITION.*

Les différentes finitions commercialisées sont :

— *Le tube en carton bakélisé, en verre, en stéatite,* pour condensateurs imprégnés à la cire. Ils sont fermés par un produit d'obturation à haut point de fusion. La plage de température de fonctionnement est comprise entre — 20 et + 70° C.

— *Le moulage de plastique* en deux coquilles. La difficulté consiste à souder parfaitement les deux coquilles afin que l'humidité ne puisse pénétrer.

— *L'enrobage de cire synthétique* qui donne une protection meilleure. L'araldite, par exemple, sert à la fois comme produit d'imprégnation et comme enrobage.

— *Le tube d'aluminium* avec sorties isolées par une rondelle de néoprène ou de céramique qui peut être revêtu d'une pellicule de plastique.

Ce type de condensateur imprégné à la cire minérale est très utilisé.

— *Le tube de cuivre* avec sorties par perles de verre ou de céramique ; il est réservé aux composants professionnels imprégnés à l'huile. Ils peuvent fonctionner entre — 55° C et + 100° ou + 125° C.

— *Le boîtier parallélépipédique*, généralement en acier, avec des sorties par perles de verre ou par canon de céramique ; il est adopté pour les condensateurs professionnels de forte valeur ou pour des tensions élevées. Ils sont imprégnés à l'huile.

2.3. — Les caractéristiques principales.

CONSTANTE DIÉLECTRIQUE.

Elle dépend de la densité du papier, de l'enroulement plus ou moins serré et du produit d'imprégnation. Elle est comprise entre 3,4 et 5,5.

FACTEUR DE PUISSANCE OU ANGLE DE PERTES.

Il est fonction de la densité du papier, du produit d'imprégnation et de la qualité de l'opération d'imprégnation. Il se situe entre 30 et 60.10^{-4} à 50 Hz. Les pertes augmentent avec la fréquence et avec la température.

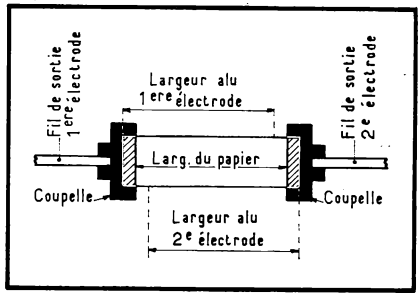


Fig. 4 - 11. — Sorties par coupelles soudées aux électrodes.

RÉSISTANCE D'ISOLEMENT.

Elle diminue de 50 % chaque fois que la température augmente de 10° C. A 20° C on obtient 10 000 MΩ/μF.

COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Il dépend de la forme du condensateur, de la rigidité du bobinage et de la nature de l'imprégnant. Il est compris entre + 200 et + 800.10^{-6}/°C.

COMPORTEMENT AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

La résistance d'isolement baisse rapidement, le courant de fuite augmente ce qui tend à échauffer l'imprégnant. De plus, la tension disruptive baisse, elle est deux fois plus faible à 100° C qu'à 20° C. C'est pourquoi il faut réduire la tension de service maximale lorsque la température augmente. Les constructeurs publient des courbes de réduction pour chacun de leurs modèles.

COMPORTEMENT SOUS TENSION ALTERNATIVE.

En aucun cas la somme de la tension continue et de la tension alternative de crête appliquée à un condensateur ne doit dépasser sa tension nominale de service (U_n) à la température d'emploi.

A 50 Hz, la tension alternative ne doit pas dépasser 20 % de la tension de

service (U_n). La tension de crête maximale pour un condensateur tubulaire est de 400 V. Elle est plus importante pour les condensateurs en boîtiers.

TOLÉRANCE SUR LA CAPACITÉ.

Elle ne peut être serrée à cause des nombreux paramètres qui interviennent au cours de la fabrication. La tolérance standard est de ± 20 %.

Pour les boîtiers de forte valeur, on peut obtenir ± 10 % et même ± 5 %.

NORMES.

La norme U.T.E. C 93 - 140 s'applique au matériel « grand public » tandis que la spécification C.C.T. 02.03 A est destinée aux condensateurs professionnels. La spécification C.C.T. 02.05 s'applique aux condensateurs pour antiparasitage et la C.E.I. 80 aux condensateurs pour courant continu.

2.4. — Les différents modèles.

2.4.1. — *CONDENSATEURS GRAND PUBLIC TUBULAIRES.*

Présentation : tube en carton bakélisé, en verre, en matière moulée, en céramique ou en aluminium, imprégnation à la cire (fig. 4 - 12).

Capacité : entre 1 nF et 1 µF (selon la tension).

Tension de service : entre 160 V et 1 000 V.

Plage de température : — 20° ou — 10° C à + 70° C.

Utilisations : découplage et liaison (surtout en B.F.).

2.4.2. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS TUBULAIRES.*

Présentation : tube étanche sorties par perles de verre ou par céramique, imprégnation à l'huile.

Capacité : entre 1 nF et 1 µF (selon la tension).

Tension de service : entre 160 V, 630 V ou 1 600 V.

Plage de température : — 55° C à + 85° C et + 100° C.

Utilisations : découplage et liaison (surtout aux fréquences basses).

2.4.3. — *BOITIERS PARALLÉLIPIPÉDIQUES.*

— PETITS MODÈLES.

Présentation : boîtier laiton ou acier, couvercle soudé, sorties par perles de verre, imprégnation à l'huile.

Capacité : entre 1 nF et 1 µF (selon la tension).

Tension de service : entre 160 V et 1 600 V.

Plage de température : — 55° C à + 85° C et + 100° C.

Utilisations : découplage et liaison (surtout aux fréquences basses, antiparasitage, etc...).

— GRANDS MODÈLES.

Présentation : boîtier acier, couvercle soudé, sorties par perles de verre seulement jusqu'à 1 000 V de tension de service, et par manchons de céramique. Imprégnation à l'huile.

Capacité : de 0,1 µF à 100 µF.

Tension de service : entre 160 V et 10 000 V.

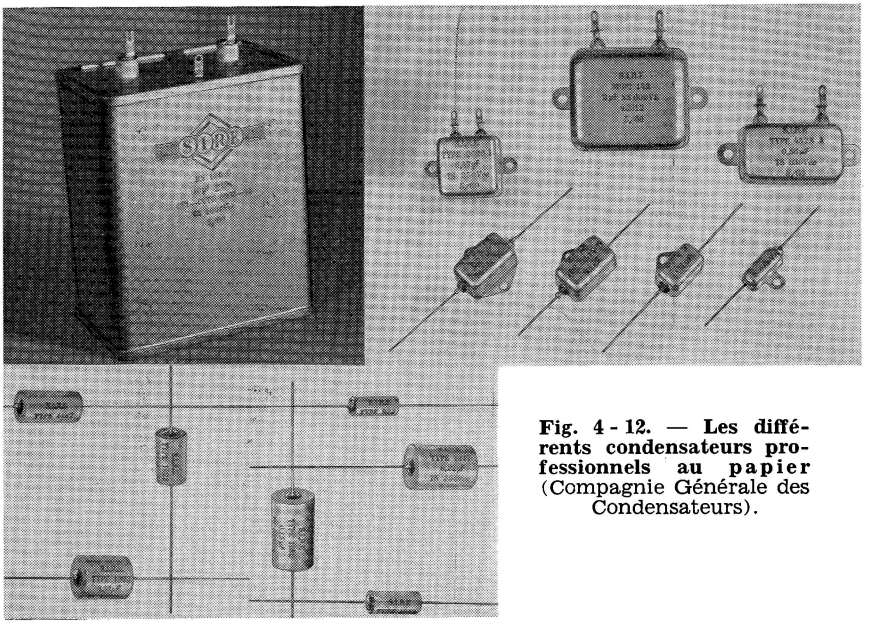


Fig. 4 - 12. — Les différents condensateurs professionnels au papier (Compagnie Générale des Condensateurs).

(Toutes les valeurs de capacité n'existent pas pour toutes les tensions. Par exemple, sous 10 000 V les valeurs de capacité s'échelonnent entre 0,1 et 0,47 µF, tandis que certains modèles sous 380 V atteignent 100 µF. Des modèles spéciaux peuvent être étudiés sur demande.)

Plage de température : — 55° C à + 85° C, + 100° C ou + 125° C.

Utilisations : découplage, filtrage, correction du facteur de puissance, fluorescence, flash électronique, démarrage des moteurs, téléphonie, etc...

3. — LES CONDENSATEURS AU PAPIER MÉTALLISÉ.

3.1. — Généralités.

Dans les condensateurs au papier la nécessité de bobiner au moins six feuilles (papier et aluminium) conduit à des dimensions importantes pour une capacité donnée.

Si l'on dépose une mince couche de métal sur le papier on s'aperçoit qu'il n'est plus nécessaire de doubler le papier.

Un condensateur formé avec deux feuilles de papier métallisé met en lumière une propriété nouvelle. Un défaut du papier ou un « point conducteur » donnent sous une certaine tension un manque d'isolement. Une étincelle jaillit et vaporise le métal en contact. Cela n'est possible qu'à cause de sa faible épaisseur. De plus, l'oxyde formé est un excellent isolant. On dit que le condensateur au papier métallisé a une possibilité d'*auto-cicatrisation* ou d'*auto-régénération* en cas de court-circuit interne.

Donc, ces condensateurs ont un très faible volume pour des caractéristiques données, ils sont pratiquement « inclaquables » en service courant. De plus,

par leur procédé de fabrication, ils sont non-inductifs et présentent une très faible résistance série.

3.2. — Le papier spécial.

C'est un papier pour condensateur (densité 1,20) entre 5 et 12 μ d'épaisseur. Pour atténuer ses irrégularités de surface, il est généralement laqué, après un séchage soigné, soit :

— par une *couche de polystyrène :*

ε : 2,2, densité : 1,05, épaisseur normale : 1 μ (deux laquages successifs de 0,5 μ) ; elle supporte une température maximale de 100° C, ce qui limite la température d'imprégnation à 90° C et le service à 70° C. L'imprégnation doit être faite à l'ozokérite (ε du condensateur terminé : 4,5).

— ou par une *couche d'acétobutyrate de cellulose :*

ε : 4, densité : 1,2, épaisseur normale 1 μ (deux laquages successifs de 0,5 μ) ; elle supporte une température maximale de 120° C, la température d'imprégnation peut atteindre 110-115° C et le service 90-100° C, imprégnation à l'ozokérite (ε du condensateur terminé : 4,75), résistance d'isolement légèrement plus faible qu'avec le polystyrène.

Il est possible de demander un double laquage avec les deux produits. Le séchage est très long. Les températures limites sont celles du polystyrène. La résistance d'isolement est meilleure. L'épaisseur des deux couches est toujours de 1 μ.

3.3. — La métallisation du papier.

Elle peut s'effectuer soit au zinc, soit à l'aluminium.

3.3.1. — *MÉTALLISATION AU ZINC.*

A son avantage, il faut citer sa température de vaporisation plus faible (340° C).

La bande de papier est placée dans une cloche à vide (0,01 mmHg) après un séchage poussé. On opère d'abord une prémétallisation d'accrochage à l'argent par évaporation cathodique à 1 000° C. Il ne s'agit pas d'une couche complète, mais seulement de quelques points d'argent sur le papier pour faciliter l'adhérence du zinc.

Ensuite, dans la même enceinte, on vaporise une couche de zinc à 340° C de 0,02 à 0,06 μ d'épaisseur. La résistance de la couche est comprise respectivement entre 3 Ω et 1 Ω par unité carrée. Des précautions sont prises afin que le zinc ne se dépose que sur une face du papier. Des réglettes fixes permettent la réservation des marges.

On voit que la couche de métal est extrêmement mince et qu'une étincelle peut facilement la vaporiser ; l'oxyde de zinc produit est un excellent isolant. Par contre, les condensateurs doivent être étanches afin d'éviter l'oxydation des électrodes.

C'est ce procédé qui est le plus employé dans le monde, il repose sur les brevets R. Bosch A.G.

3.3.2. — *MÉTALLISATION A L'ALUMINIUM.*

Ce procédé est utilisé dans les pays anglo-saxons. Il repose sur les brevets Hunt. La vaporisation de l'aluminium s'effectue de la même façon que celle

du zinc, cependant la température doit être poussée jusqu'à 1 000° C. L'épaisseur de la couche est comprise entre 0,1 et 0,5 μ, sa résistance est voisine de celle d'une feuille d'aluminium de mêmes dimensions. Mais, il est difficile de prévoir les marges en cours de métallisation, elles doivent être établies ensuite.

3.4. — La finition du papier métallisé.

Afin que le papier métallisé puisse servir à la fabrication des condensateurs il faut procéder à l'établissement des marges et à l'élimination des défauts.

3.4.1. — *ETABLISSEMENT DES MARGES.*

Pour assurer l'isolement des électrodes l'une par rapport à l'autre, il faut prévoir une marge non métallisée à gauche sur une bobine, à droite sur l'autre (fig. 4 - 13).

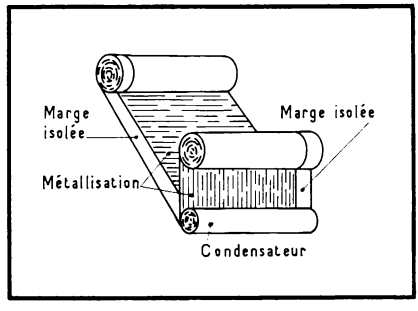


Fig. 4 - 13. — Bobinage des armatures d'un condensateur au papier métallisé avec marges opposées.

Dans le procédé au zinc, on place une réglette mobile dans la cloche à vide de façon que le zinc ne se dépose pas sur le papier à l'endroit des marges.

Pour la couche d'aluminium, cette disposition ne donne pas de bons résultats, aussi on préfère enlever l'aluminium déposé en le brûlant, soit par étincelage, soit par une roulette présentant une différence de potentiel par rapport à la couche métallique.

Ce procédé peut seul être utilisé pour la confection des « grecques » pour la fabrication des condensateurs miniatures à une feuille.

La largeur des marges est conditionnée par la tension de service du condensateur à fabriquer. Elle est comprise entre 1,5 et 5 mm.

3.4.2. — *ELIMINATION DES DÉFAUTS.*

Il est nécessaire d'éliminer la métallisation autour des défauts, des trous microscopiques et des points conducteurs du papier, afin d'éviter un trop grand nombre d'arcs à la mise en service du condensateur terminé.

On fait donc défiler les bandes entre deux rouleaux présentant entre eux une différence de potentiel égale à la tension de service du condensateur. La métallisation est brûlée autour de tous les points présentant un isolement trop faible.

3.5. — La fabrication des condensateurs.

3.5.1. — *BOBINAGE.*

On place sur la machine à bobiner deux rouleaux de papier métallisé préparés de façon que les marges soient opposées. Les faces métallisées sont du

même côté. Le condensateur ainsi décrit est prévu pour une tension de service de 250 V continus. Pour les tensions supérieures, il faut intercaler une ou plusieurs feuilles de papier non métallisé entre chacune des électrodes.

L'existence de marges non métallisées fait apparaître à chacune des extrémités de l'enroulement la tranche de l'une des deux couches métalliques. Une pulvérisation métallique par schoopage ou par évaporation cathodique réalise la continuité électrique des spires (fig. 4 - 14).

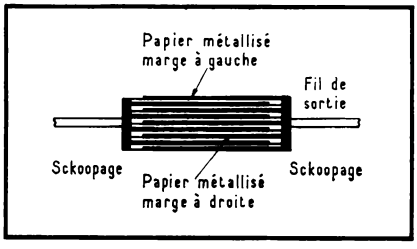


Fig. 4 - 14. — Soudure des sorties sur les tranches du condensateur (représentation schématique).

Les fils de sortie sont soudés à l'étain directement sur la métallisation. Le condensateur est rigoureusement anti-inductif.

3.5.2. — *IMPRÉGNATION.*

Avant de fermer complètement les boîtiers des condensateurs, ceux-ci sont séchés et imprégnés selon le même procédé que pour les condensateurs au papier ordinaire.

Pour les papiers laqués, le meilleur imprégnant est l'ozokérite (cire minérale) ; la température ne doit pas dépasser 90° C pour les papiers laqués au polystyrène, et 110°-115° C pour l'acétobutyrate de cellulose.

Pour les papiers non laqués et les condensateurs étanches, généralement de volume important, on utilise l'huile minérale.

3.5.3. — *FINITION.*

Les différentes finitions commercialisées sont :

— *L'enrobage de cire synthétique,* qui assure une bonne étanchéité et donc une bonne protection du condensateur qui craint particulièrement l'humidité.

Le volume du condensateur est le plus réduit à caractéristiques égales. C'est la présentation la plus courante.

— *Le tube d'aluminium* avec sorties isolées par une rondelle de néoprène ou de céramique, et qui peut être revêtu d'une pellicule de plastique. Il en existe des modèles de toutes les dimensions.

— *Le boîtier parallélépipédique* en acier ou en aluminium avec sorties par perles de verre ou par canon de céramique ; il est réservé au matériel spécial à capacité élevée pour usage professionnel. Ces condensateurs sont imprégnés à l'huile minérale.

3.5.4. — *FABRICATION DU CONDENSATEUR SUBMINIATURE.*

Pour obtenir des condensateurs encore plus petits, on a mis au point un procédé permettant de n'utiliser qu'une feuille de papier métallisé, sur une

face (fig. 4 - 15). Les deux électrodes sont séparées par une marge non métallisée en forme de créneaux ou « grecques ». En bobinant cette feuille sur elle-même, les surfaces correspondant aux électrodes différentes se placent l'une au-dessus de l'autre, séparées par le papier et formant capacité. Le pas des

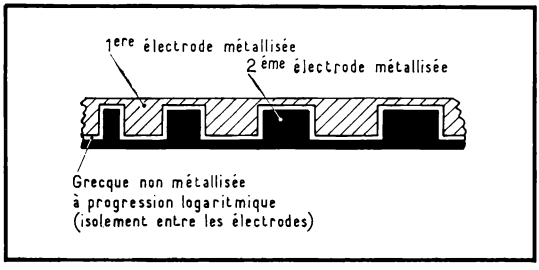


Fig. 4 - 15. — Principe du condensateur subminiature.

grecques augmente logarithmiquement en fonction de l'accroissement du diamètre du bobinage. La fabrication et la soudure des sorties s'effectuent comme pour les condensateurs à deux feuilles.

En effet, chacun des bords de la feuille ne correspond qu'à une électrode.

Ces condensateurs sont présentés sous plastique. Ils sont prévus pour une tension de service de 150 V. A titre d'exemple, un bobinage de condensateur de 10 nF mesure 7 × 3 mm.

Le condensateur terminé et enrobé mesure 11 × 4,5 mm.

3.5.5. — *FORMATION DES CONDENSATEURS.*

Les condensateurs terminés sont soumis à cette formation destinée à éliminer les points de moindre rigidité diélectrique par auto-cicatrisation. Elle s'effectue en deux temps :

— application brutale d'une forte énergie par décharge d'un condensateur de forte valeur,

— puis, lente montée en tension jusqu'à la valeur de la tension d'essai, en général 40 à 50 V/μ d'épaisseur du papier.

3.6. — Les caractéristiques principales.

— *TENSION DE SERVICE ET TENSION D'ESSAI MAXIMALE.*

La définition de ces tensions est tout à fait différente de celle utilisée pour les condensateurs au papier ordinaire. En effet, ici, il n'existe pas de tension de claquage, mais des auto-cicatrisations de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que la tension appliquée aux bornes augmente.

Pour des utilisations de longue durée, où la sécurité est primordiale, on adopte une tension de service égale à 20 V par micron d'épaisseur de papier. De nombreux fabricants n'indiquent pas de valeur de tension d'essai sur leurs documentations.

Certains donnent pour $T_E = 1{,}25\ T_S$, d'autres atteignent 1,5 fois la tension de service.

Pour une utilisation de courte durée (fusées, etc...), on peut augmenter la tension de service et gagner encore en volume.

— RÉDUCTION DE LA TENSION DE SERVICE EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

La plupart des condensateurs français sont à imprégnation par cire minérale et sont prévus pour fonctionner entre — 20° C et + 70° C. Ils peuvent fonctionner à la tension de service jusqu'à + 40° C. Au-dessus, il faut appliquer un coefficient de réduction qui est généralement : 97 % pour + 55° C et 86 % pour + 70° C.

Certains condensateurs étrangers couvrent la plage — 40° C à + 85° C et même — 100° C à + 125° C. Le produit d'imprégnation est une résine polyester ou une résine éthoxylique. La courbe de réduction intervient respectivement pour les température ambiantes supérieures à + 60° C et à + 100° C.

— RÉSISTANCE D'ISOLEMENT.

La résistance d'isolement des condensateurs à une ou à deux feuilles de papier métallisé (150-250 V) est légèrement inférieure à celle des condensateurs au papier de même tension de service. Cela est normal par suite de l'épaisseur plus faible du diélectrique. Elle est de l'ordre de 500 MΩ/μF à 20° C.

L'isolement des condensateurs métallisés prévus pour des tensions supérieures est du même ordre de grandeur que celui des condensateurs au papier ordinaire car les feuilles intermédiaires donnent une construction analogue dans les deux cas (1 000 à 3 000 MΩ/μF à 20° C).

La réduction de l'isolement, lorsque la température augmente, est la même que celle observée pour les condensateurs au papier ordinaire.

— FACTEUR DE PUISSANCE OU ANGLE DE PERTE.

Il est du même ordre de grandeur que celui des condensateurs au papier. Il dépend de la résistance interne des électrodes (résistance série), de la qualité du papier, du produit d'imprégnation et de la technologie de fabrication.

Il est inférieur à 100.10^{-4} à 20° C et à 1 kHz.

— IMPÉDANCE H.F.

Elle est fonction de la résistance des électrodes, de la résistance de la fixation des sorties, de l'inductance des armatures et du volume du condensateur.

Par suite de la technologie de fabrication adoptée, ces différents paramètres sont très petits. L'impédance H.F. est faible et permet l'utilisation de ces condensateurs aux fréquences élevées jusqu'à 100 MHz.

— RÉDUCTION DE VOLUME.

— 80 % pour un condensateur à une feuille T_s = 150 V.
— 60 % pour un condensateur à deux feuilles T_s = 250 V.
— 35 % pour un condensateur à dix feuilles T_s = 630 V.

— TOLÉRANCE SUR LA CAPACITÉ.

— normale ± 20 %.
— sur demande ± 10 %.

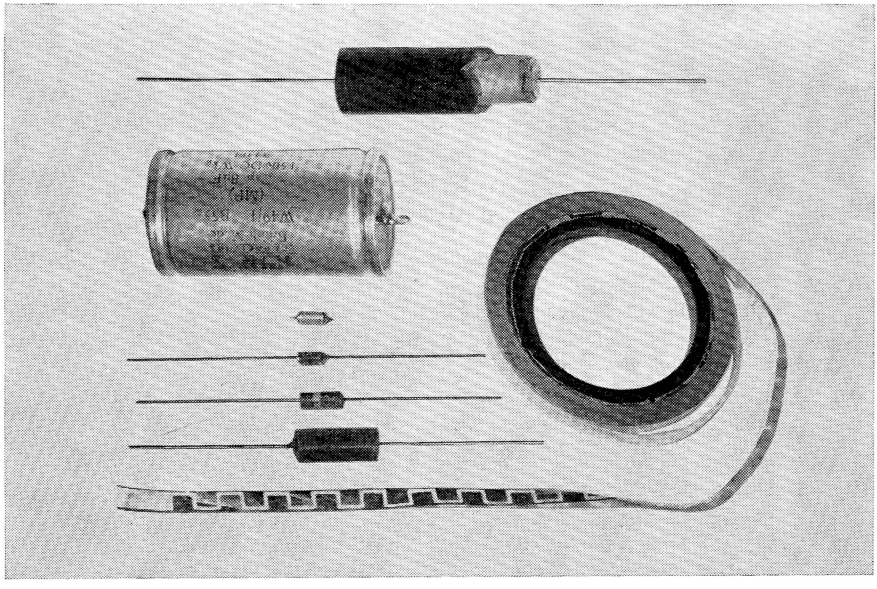


Fig. 4 - 16. — Condensateurs au papier métallisé grand public.

— *NORMES.*

Il n'existe pas de normes françaises à ce jour. Il faut se reporter pour le matériel professionnel :

— à la norme anglaise : R.C.S. 136.

— à la norme U.S.A. : MIL.C. 18 312 A.

3.7. — Les différents modèles.

3.7.1. — *CONDENSATEURS GRAND PUBLIC TUBULAIRES.*

— *Type subminiature* à une feuille (fig. 4 - 16).

Présentation : enrobage plastique, imprégnation à la cire.
Capacité : entre 1 nF et 40 nF.
Tension de service : 150 V.
Plage de température : — 40° à + 70° C et — 100° C à + 125° C.
Utilisations : découplage H.F. et B.F.

— *Type miniature.*

Présentation : enrobage plastique ou tube aluminium, imprégnation à la cire.
Capacité : 0,1 µF à 5 µF (selon la tension).
Tension de service : entre 250 et 630 V.
Plage de température : — 20° C à + 70° C.
Utilisations : découplage H.F. et B.F., antiparasitage.

3.7.2. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS TUBULAIRES.*

Présentation : en tube métallique étanche, imprégné à la cire (fig. 4 - 16).
Capacité : 0,1 μF à 20 μF (selon la tension).
Tension de service : entre 250 V et 630 V.
Plage de température : — 20° C à + 70° C et — 40° C à + 100° C.
Utilisations : découplage H.F. et B.F., antiparasitage.

3.7.3. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS SOUS BOITIERS.*

Présentation : en boîtier parallélipipédique en aluminium ou en acier étanche, sorties par perles de verre ou manchons de céramique, imprégnation à la cire ou à l'huile minérale.
Capacité : de 1 μF à 100 μF (selon la tension).
Tension de service : entre 150 V et 630 V.
Plage de température : — 40° C à + 70° C ou + 100° C.
Utilisations : découplage H.F. et B.F., antiparasitage, fluorescence, téléphonie.

Note. — L'auto-cicatrisation se produit mal lorsque la tension aux bornes du condensateur est inférieure à 110 V ; le risque est de constater des défauts d'isolement.

Pour cette raison, les condensateurs au papier métallisé sont déconseillés pour le découplage sous faible tension (C.A.G., C.A.F., transistors, par exemple) et dans les circuits qui ne peuvent tolérer des court-circuits momentanés.

4. — LES CONDENSATEURS AU FILM PLASTIQUE ET AU FILM PLASTIQUE MÉTALLISÉ.

4.1. — Les films plastiques.

Les plastiques sont en pleine évolution et l'industrie est à même de fournir des films qui remplacent avantageusement le papier pour la fabrication des condensateurs. En effet, ces films n'ont pas de défauts, ni de trous microscopiques, et ils peuvent être utilisés en simple épaisseur. Ils permettent d'obtenir une résistance d'isolement très importante qui diminue moins rapidement lorsque la température augmente.

Cinq sortes de plastiques sont actuellement couramment utilisés :

— *Le polystyrène* (Polystyrol, Styrofoil, Styroflex) se caractérise par une résistance d'isolement très élevée, une absorption diélectrique très faible et un angle de pertes intéressant, son coefficient de température est légèrement négatif ; en revanche, son point de ramollissement n'est pas très élevé (+ 85° C).

— *Le polytétrafluoréthylène* (P.T.F.E., Téflon) possède les mêmes avantages que le polystyrène ; de plus, il peut être employé jusqu'à 250° C. Par contre, son prix est élevé et il est difficile d'obtenir des films de moins de 50 μ.

— *Le polychlorotrifluoréthylène* (P.C.T.F.E. ou Kel.F.) admet une température maximale de 150° C, son prix est raisonnable, et on obtient plus facilement des films minces.

— *Le polytéréphtalate d'éthylène* (Polyester, Mélinex, Mylar, Térylène) est excellent jusqu'à 130° C, et il peut être fabriqué en films minces (6 μ). Il peut

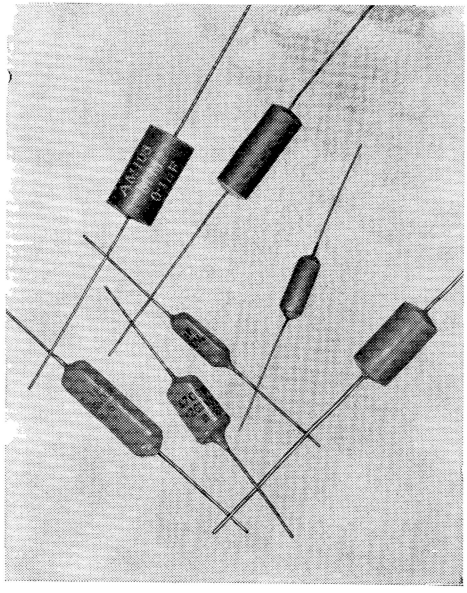


Fig. 4 - 17. — Condensateurs miniature au papier métallisé.

être utilisé tel quel ou métallisé. Il doit être imprégné au polystyrène ou à l'huile minérale.

— *Les polycarbonates* peuvent être stabilisés par un traitement thermique. Ils ont un coefficient de température presque nul jusqu'à 125° C, un angle de pertes réduit et un coefficient diélectrique élevé.

D'autres plastiques sont actuellement à l'étude.

4.2. — La fabrication.

On bobine ensemble deux bandes d'aluminium de quelques microns d'épaisseur, séparées par deux films plastiques de 6 à 12 μ (fig. 4 - 18). En effet, le

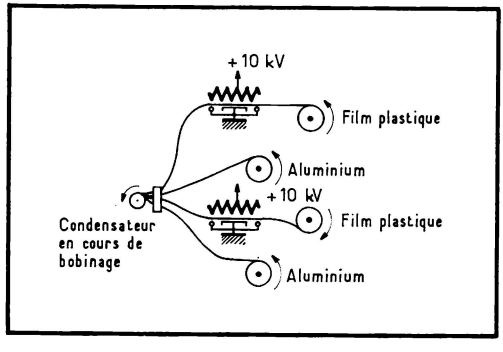


Fig. 4 - 18. — Schéma de la fabrication des condensateurs au film plastique.

film plastique étant sans défaut et sans trou, il n'est pas nécessaire d'en prévoir deux épaisseurs superposées, pour une tension de service de 250 V.

Cependant, pour les condensateurs de tension de service élevée, on préfère placer plusieurs films plutôt que d'augmenter leur épaisseur.

De grandes précautions sont à prendre pour le bobinage, car le film plastique se charge facilement en électricité statique et il attire toutes les poussières. Il faut opérer dans un local propre. La machine est munie d'un peigne métallique relié à une source de tension élevée pour éliminer les charges statiques.

Deux variantes sont appliquées :

4.2.1. — *FABRICATION DES CONDENSATEURS GRAND PUBLIC SANS PROTECTION EXTÉRIEURE.*

Les deux bandes de film plastique sont plus larges que les deux bandes d'aluminium. Les sorties sont obtenues en intercalant deux fils de cuivre étamé en contact avec chacune des électrodes au 1/4 et au 3/4 du bobinage en cours de réalisation. Les deux fils correspondant à la même électrode sont torsadés entre eux (fig. 4 - 19) afin de réduire l'inductance du condensateur. Ces fils peuvent être intercalés et maintenus par pression ou soudés aux électrodes, afin d'éviter les mauvais contacts.

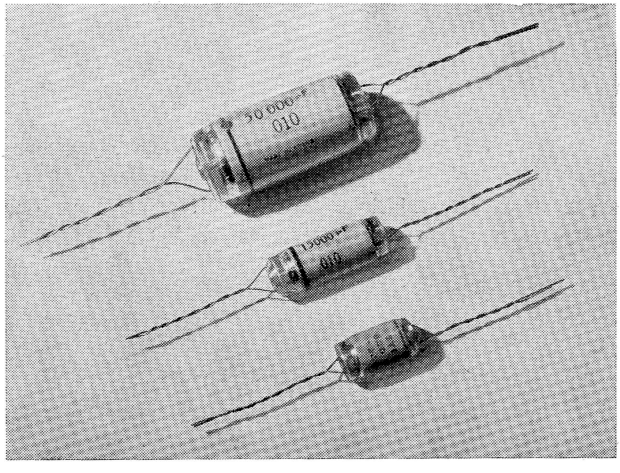


Fig. 4 - 19. — Condensateurs au polystyrène du type grand public. A noter les sorties doubles torsadées et le rétrécissement des extrémités du condensateur.

Dès le bobinage terminé, le condensateur est soumis à une élévation de température supérieure à la température de relaxation. Le film est obligé de se contracter, il comprime fortement les électrodes, chasse l'air emprisonné dans le condensateur et élimine les vides qui auraient pu se produire. En même temps, les extrémités du rouleau se trouvent scellées ce qui assure l'étanchéité du condensateur qui n'a pas besoin d'être imprégné ni protégé. C'est le mode de fabrication le plus économique.

4.2.2. — *FABRICATION DES CONDENSATEURS PROFESSIONNELS ET DES CONDENSATEURS GRAND PUBLIC PROTÉGÉS.*

Une bande d'aluminium déborde du plastique à droite et l'autre à gauche. Les fils de sortie sont soudés sur les électrodes, soit par évaporation cathodique, soit par schoopage, selon un procédé connu. Puis le condensateur est enrobé et imprégné, s'il s'agit de Mylar.

Quelques modèles sont placés dans des boîtiers métalliques remplis de cire ou d'huile.

4.3. — La fabrication des condensateurs à film plastique métallisé.

Afin de réduire le volume des condensateurs, on a pensé métalliser également le film plastique.

En France, il est fabriqué un film de Mylar de 6 μ d'épaisseur métallisé au zinc (0,06 μ), comme pour le papier. Afin d'éviter l'oxydation du zinc, la couche est recouverte de laque acétobutyrate (1 μ).

D'autres plastiques peuvent être métallisés et des études sont en cours.

Une marge est réservée sur un des côtés de la bande, afin de pouvoir métalliser la tranche et adopter le principe de fabrication retenu pour les condensateurs au papier métallisé.

4.4. — Les caractéristiques.

— COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Entre — 100 et — 150.10^{-6}/° C.

Pour les polycarbonates : — 60 ± 40.10^{-6}/° C.

— ANGLE DE PERTES, entre 5 et 15.10^{-4} à 20° C et 1 kHz. Il est extrêmement réduit.

— ABSORPTION DIÉLECTRIQUE, très faible, voisine de 0,02 %. De ce fait, la charge résiduelle après décharge du condensateur est également très faible.

— STABILITÉ, des condensateurs stockés pendant un an n'ont pas varié de valeur de capacité de 0,5 %.

— ISOLEMENT, entre bornes, au moins 100 000 MΩ, entre bornes et masse ; pour les condensateurs sous tube ou sous boîtier métallique au moins 50 000 MΩ à 20° C (fig. 4 - 20).

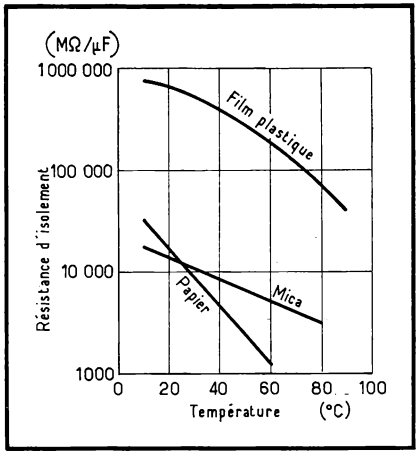


Fig. 4 - 20. — Comparaison entre la résistance d'isolement des condensateurs isolés au film plastique, au mica et au papier, en fonction de la température.

— TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

± 20 %, valeurs normalisées E 6.

± 10 %, valeurs normalisées E 12.

± 5 %, ± 2 %, ± 1 %, valeurs normalisées E 24.

— TENSIONS DE SERVICE NORMALISÉES.

25, 63, 100, 160, 250, 400, 630 V.

— NORMES.
F.N.I.E. 026 — Condensateurs polyester (Mylar).
F.N.I.E. 027 — Condensateurs polystyrène.
C.C.T. 02.07 — Condensateurs polytéréphtalate d'éthylène (Mylar).

4.5. — Les différents modèles.

4.5.1. — *CONDENSATEURS GRAND PUBLIC AU POLYSTYRÈNE SANS PROTECTION.*

Capacité : entre 20 pF et 1 μF (selon la tension).
Tension de service : entre 25 V et 630 V.
Plage de température : — 40° C à + 80° C.
Utilisations : très large entre le courant continu et la télévision.

4.5.2. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS AU POLYSTYRÈNE.*

Présentation : enrobage plastique tubulaire ou plat (nombreux modèles). (Fig. 4 - 21).
Capacité : entre 1 000 pF et 1 μF (selon les modèles et la tension).
Tension de service : entre 25 V et 400 V.
Plage de température : — 40° C à + 85° C.
Utilisations : entre le courant continu et plusieurs milliers de MHz, selon les modèles.

4.5.3. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS AU MYLAR (polyester).*

Présentation : enrobage plastique tubulaire, plat ou parallélépipédique à sorties axiales ou radiales pour circuits imprimés.
Capacité : entre 100 pF et 5 μF (selon les modèles et la tension de service).
Tension de service : entre 125-160 V et 5 000 V.
Plage de température : — 55° C à + 125° C.
Utilisations : entre le courant continu et 10 000 MHz.

4.5.4. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS AU POLYCARBONATE.*

Présentation : enrobage plastique tubulaire ou plat à sorties axiales ou radiales pour circuits imprimés.
Capacité : entre 1 nF et 10 μF (selon les modèles et la tension de service).
Tension de service : entre 63 V et 400 V.
Plage de température : — 55° C à + 125° C.
Mêmes utilisations.

4.5.5. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS AU MYLAR MÉTALLISÉ.*

Présentation : enrobage plastique tubulaire ou plat à sorties axiales ou radiales pour circuits imprimés.
Capacité : entre 1 nF et 10 μF (selon les modèles et la tension de service).
Tension de service : entre 63 V et 400 V.
Plage de température : — 40° C à + 85° C ou — 55° C à + 125° C.
Utilisations : condensateurs miniatures à fiabilité élevée pour tous usages entre le courant continu et plusieurs milliers de MHz.

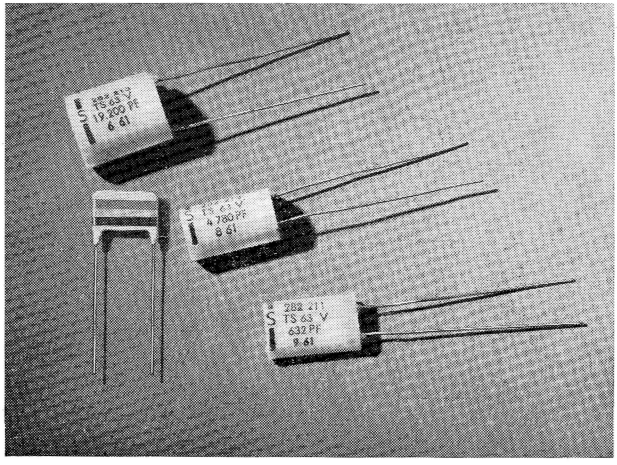


Fig. 4 - 21. — Condensateurs professionnels au polystyrène.

5. — LES CONDENSATEURS AU MICA.

Ce sont des condensateurs précis et stables utilisés surtout en H.F.

5.1. — Le mica.

Le mica est un corps minéral naturel de composition chimique complexe. C'est un silicate d'aluminium additionné de sels acides de métaux alcalins. Il en existe de nombreuses variétés.

La meilleure convenant à la fabrication des condensateurs est le mica rose des Indes. Il se clive facilement jusqu'à des épaisseurs de quelques microns.

Sa résistivité est très élevée (10^{15} à 10^{17} Ω.cm), son angle de pertes faible (5.10^{-4}) et sa constante diélectrique est comprise entre 6,5 et 7.

Sa rigidité diélectrique n'est pas linéaire en fonction de l'épaisseur ; on obtient 200 kV.mm pour des faibles épaisseurs (10 μ) et seulement 40 kV.mm pour des épaisseurs de l'ordre du mm.

C'est un excellent diélectrique utilisable jusqu'à des fréquences très élevées.

5.2. — La fabrication.

5.2.1. — *CONDENSATEURS A FEUILLES MÉTALLIQUES ET A LAMES DE MICA EMPILÉES.*

Les feuilles de mica naturel sont nettoyées, clivées et « ébarbées ». C'est-à-dire que les défauts sont éliminés de façon qu'il ne reste aucune inclusion, ni écailles. Puis, elles sont triées en fonction de leur surface et de leur épaisseur.

Les feuilles choisies pour le condensateur à fabriquer sont découpées aux dimensions convenables. On empile alternativement une lame de mica et une feuille de cuivre, de laiton, d'étain ou d'aluminium, légèrement moins longue (fig. 4 - 22). Les feuilles paires débordent à droite et les feuilles impaires à gauche. On empile le nombre d'éléments nécessaires pour obtenir la capacité désirée.

Les prises de contact de sortie sont fixées et soudées électriquement aux armatures. Le bloc est serré fortement entre des plaques de compression et il est moulé sous pression dans un boîtier en plastique tout en étant imprégné. On obtient, ainsi, un condensateur étanche et sans bulles d'air entre les armatures et le diélectrique.

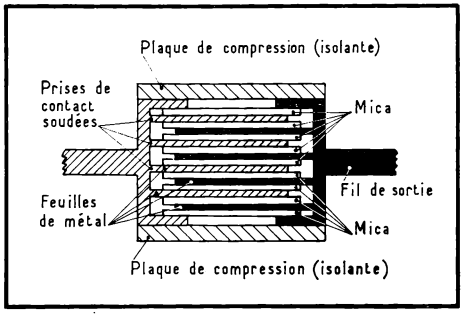


Fig. 4 - 22. — Condensateurs au mica à feuilles métalliques empilées.

Ce mode de fabrication est réservé aux condensateurs de puissance devant supporter des courants H.F. importants. Leur résistance série est la plus faible possible.

5.2.2. — *CONDENSATEURS A LAMES DE MICA ARGENTÉES.*

Ces types utilisent le procédé le plus répandu pour les condensateurs qui ne doivent pas supporter une puissance H.F. importante (fig. 4 - 23).

Les lames de mica sont contrôlées, découpées aux dimensions voulues, puis nettoyées à l'acétone ou au trichloréthylène.

Les lames sont asséchées en étuve à 120° C pendant 20 heures, afin que l'argenture se fixe bien sur le mica ; l'argenture peut se faire soit par évaporation cathodique sous vide, soit par réduction d'un oxyde d'argent.

L'évaporation cathodique est effectuée dans une cloche à vide (10^{-5} à 10^{-6} mm Hg). Un filament de tungstène chauffé vaporise l'argent. Le vide augmente le libre parcours moyen des molécules qui se déposent sur les surfaces froides. L'épaisseur de la couche est de l'ordre du micron. Des caches sont prévus sur les lames de mica, afin de réserver les surfaces qui ne doivent pas être argentées.

Dans le deuxième procédé, l'oxyde d'argent est mélangé à une huile (huile de romarin ou de lavande, par exemple). La pâte filtre au travers d'un écran de soie (stencil) et ne se dépose qu'aux endroits à argenter. Puis, les lames sont placées dans un four porté à 400°-500° C. L'huile est volatilisée et l'oxyde est réduit en argent métallique qui s'accroche au mica.

Il faut veiller que la couche soit bien homogène et bien incrustée à la surface du mica.

Pour les condensateurs de faible valeur, une feuille métallisée sur les deux faces suffit et les connexions sont soudées aux armatures.

Pour obtenir des condensateurs de valeur plus élevée, on est obligé d'empiler plusieurs lames. L'argenture est déposée de telle façon qu'il y ait un contact naturel entre les métallisations formant la même armature. Il est nécessaire

également d'argenter parfaitement la tranche des lames de mica. Les prises de contact sont soudées aux électrodes. Puis, l'empilage est mis sous pression et enrobé comme pour le premier procédé de fabrication.

L'étanchéité doit être parfaite car la protection contre l'humidité est primordiale. En effet, un condensateur ayant absorbé de l'humidité perd ses qualités fondamentales.

Pour l'imprégnation et la protection, on utilise :

— Les *cires minérales* pour les condensateurs devant fonctionner entre — 25° et + 70° C.

— Les *résines éthoxyliques chargées ou naturelles* (Araldite) entre — 70° et + 120° C.

— Le *formaldéhyde de phénol chargé et moulé* (Bakélite) ne permet pas une étanchéité parfaite. Cette protection est complétée par une imprégnation à la cire minérale (— 35° et + 70° C).

— Les *boîtiers de céramique ou de verre* avec joints soudés ou avec joints à l'araldite, complétés par une imprégnation également à l'araldite (— 70° et + 120° C).

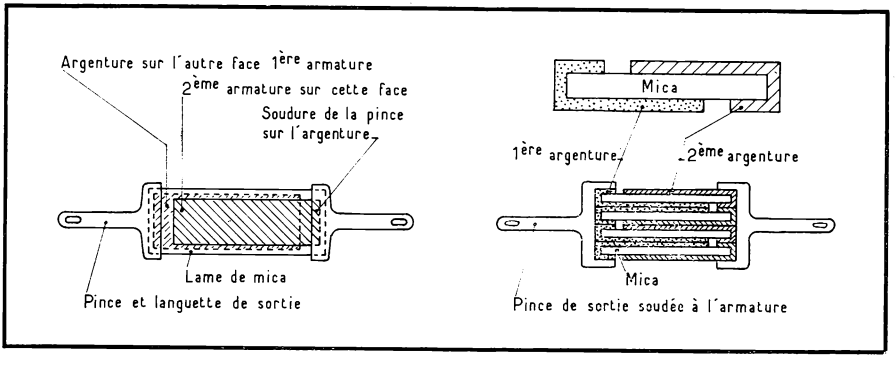


Fig. 4 - 23. — Condensateurs au mica argenté. A gauche, condensateur de faible valeur à une lame de mica ; à droite, condensateur de forte valeur à lames empilées (détail d'une lame et condensateur terminé).

5.3. — Les caractéristiques.

— COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Généralement, entre — 100 et + 100.10^{-6}/° C.

— ANGLE DE PERTES.

Il dépend de la qualité du mica, de la température, de la fréquence, des contraintes mécaniques et de l'humidité.

Un très bon mica naturel atteint 2.10^{-4} à 20° C et à 1 MHz.

Un condensateur bien construit, avec une résistance série faible, à 20° C et à 1 MHz, doit avoir un angle de pertes de 5.10^{-4}. A 70° C, il est encore de 8.10^{-4}.

Lorsqu'on élève la tension aux bornes du condensateur, l'angle de pertes augmente selon une loi sensiblement géométrique.

— RÉDUCTION DE LA TENSION DE SERVICE EN FONCTION DE L'ÉCHAUFFEMENT.

Les condensateurs utilisés en H.F. ont à absorber une puissance réactive importante. Leur échauffement suit une loi particulière. A une certaine puissance, il croît rapidement jusqu'à détérioration de la pièce ; c'est un *emballement.*

C'est pourquoi les fabricants publient des courbes pour chacun de leurs modèles (fig. 4 - 24), donnant en fonction de la fréquence, la tension, l'intensité efficace et la puissance réactive maximales pour un échauffement constant qui est de 20° C, dans une ambiance de 20° C. La marge de sécurité est importante puisque le condensateur s'emballe vers 100° C.

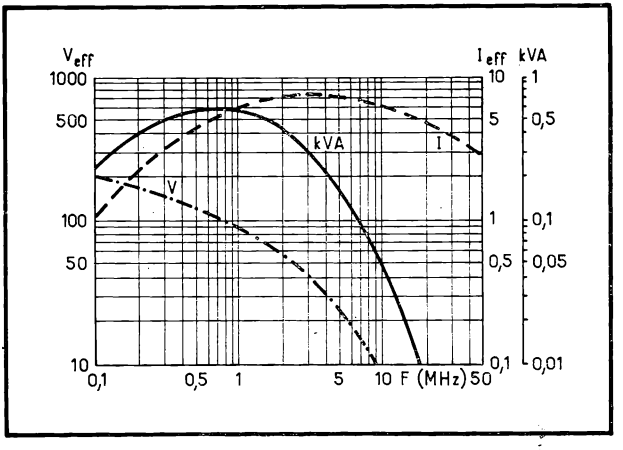


Fig. 4 - 24. — Tension efficace, intensité et puissance en fonction de la fréquence pour un condensateur Stéafix de 10 000 pF. La tension efficace est de 200 V à 100 kHz. L'intensité à 3 MHz atteint 7 A. C'est pour cette valeur que la résistance série est minimale. La puissance réactive dépasse 600 VA dans une très large bande de fréquence.

Lorsque la température ambiante s'élève, il faut réduire la puissance réactive aux bornes du condensateur pour conserver la sécurité de fonctionnement.

Pour une ambiance de 70° C on adopte généralement 60 % des valeurs données par les courbes. Les condensateurs professionnels de la catégorie 44 doivent être plus largement calculés, car ils doivent fonctionner dans une ambiance de 85° C, sans réduction des paramètres.

— ISOLEMENT.

L'isolement entre bornes doit être d'au moins 10 000 MΩ à 20° C. Pour les condensateurs professionnels, dont la valeur est inférieure à 10 000 pF, l'isolement doit être supérieur à 50 000 MΩ. Il diminue lorsque la température augmente selon une loi variable en fonction de la valeur de capacité, de la forme et des dimensions du condensateur.

— TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

± 20 %, valeurs normalisées E 6.
± 10 %, valeurs normalisées E 12.
± 5 %, ± 2 %, valeurs normalisées E 24.
± 1 %, ± 0,5 %, valeurs normalisées E 96.
Précision minimale ± 0,5 pF.

— TENSIONS DE SERVICE NORMALISÉES.

160, 300, 500, 750, 1 000, 2 000 V.

— MARQUAGE NORMALISÉ.

Le marquage est normalisé (fig. 4 - 25) selon le code de couleurs suivant :

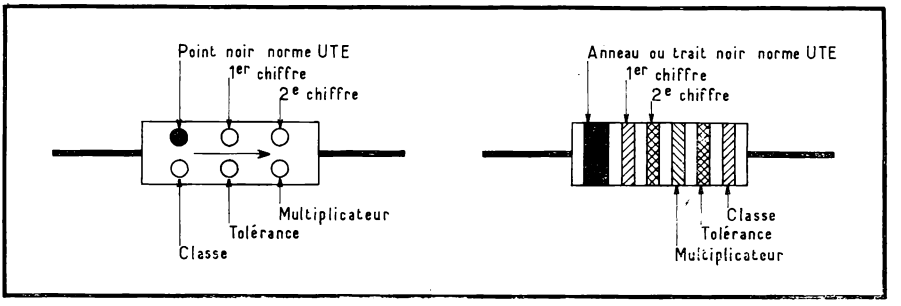


Fig. 4 - 25. — Code de marquage.

Couleur	Capacité		Tolérance % ±	Classe
	Chiffre significatif	Multiplicateur		
noir	0	1	20	
marron	1	10	1	1
rouge	2	100	2	
orange	3	1 000		2
jaune	4	10 000		
vert	5			3
bleu	6			
violet	7			
gris	8		0,5	
blanc	9			
or		0,1	5	
argent			10	

Les classes correspondent aux limites du coefficient de température.

Classe	Coefficient de température (10^{-6}/° C)	Limite maximale de la dérive après un cycle thermique (pF)
1	— 200 à + 200	± 0,5 % C_n
2	— 100 à + 100	± 0,3 %
3	— 20 à + 50	± (0,05 % + 0,1 pF)

C_n = valeur nominale de la capacité.

Les *catégories normalisées* sont les suivantes :

43 : — 55° à + 125° C, basse pression 85 mb.
44 : — 55° à + 100° C, basse pression 85 mb.
55 : — 40° à + 85° C, basse pression 533 mb.
66 : — 25° à + 70° C.
76 : — 10° à + 70° C.
77 : — 10° à + 55° C.

Les catégories 44, 66 et 77 sont préférentielles.

— NORMES.
U.T.E. : C 93.120.
C.E.I. : 116.
C.C.T. : 02.01 A.
C.C.T. : 02.09 (condensateurs « boutons » au mica).

5.4. — Les différents modèles.

5.4.1. — *CONDENSATEURS GRAND PUBLIC.*

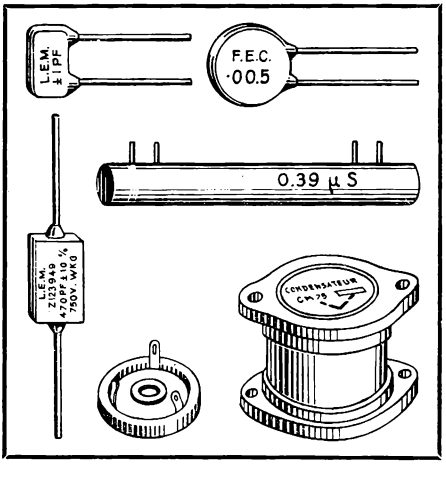
Ces condensateurs (catégories 66 ou 77) sont au mica argenté, imprégnés et enrobés à la cire minérale ou à l'araldite.
Capacité : entre 4,7 pF et 0,47 μF (selon la tension).
Tension de service : 160, 300 et 500 V.
Plage de température : — 25° à + 70° C ou — 10° à + 55° C.
Utilisation : en H.F. pour l'accord des circuits.

5.4.2. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS.*

Ces condensateurs appartiennent aux catégories 44 ou 55.
Plage de température : — 55° à + 100° ou — 40° à + 85° C.

— *Types faibles valeurs de capacité ;* au mica argenté imprégné et moulé à l'araldite.
Capacité : entre 4,7 pF et 0,1 μF.
Tension de service : 300 et 500 V.
Utilisation : en H.F. pour l'accord des circuits, les filtres et les liaisons.

— *Type haute tension et faible puissance réactive ;* les lames de mica sont plus épaisses et la gamme des valeurs est moins étendue, imprégnation et moulage à l'araldite.
Capacité : entre 4,7 pF et 0,22 μF pour 1 000 V ; entre 10 pF et 100 pF pour 4 500 V.
Tension de service : 1 000, 2 000 et 4 500 V.
Utilisation : en H.F. pour les circuits haute tension.



Les principaux condensateurs au mica de la classe professionnelle existants sur le marché.

— *Type haute tension et puissance élevée ;* avec lames de mica et feuilles métalliques en boîtiers étanches soudés ou bouchés à l'araldite. Nombreux modèles sous forme de boîtiers ou de tubes.

Capacité : entre 10 pF et 0,47 μF pour 500 V ; entre 100 pF et 1 000 pF pour 30 000 V (tolérance standard : ± 10 %).

Tension de service : entre 500 V et 30 000 V.

Utilisation : en H.F. dans les circuits de puissance.

— *Condensateurs de découplage en bouton ou en disque,* offrant la plus faible impédance jusqu'à 1 000 MHz.

Capacité : entre 50 pF et 1 000 pF (tolérances ± 20 %, ± 10 %).

Tension de service : 300 V.

Utilisation : découplage des circuits H.F., jusqu'à 1 000 MHz.

— *Lignes à retard,* constituées par des condensateurs en série, supportant des impulsions de tensions élevées et dépourvus de self-induction. Elles sont soit enrobées, soit placées dans un boîtier étanche rempli d'huile minérale, et sont caractérisées par leur temps de retard et par la valeur maximale des impulsions admissibles.

Plage des valeurs : de 0,1 à 2,5 μs.

6. — LES CONDENSATEURS AU VERRE.

Ces condensateurs sont destinés à compléter ou même à remplacer les condensateurs au mica, et ce, pour les mêmes applications en H.F. En effet, le mica provenant d'un seul point du globe (les Indes) peut venir à manquer en cas de tension internationale.

6.1. — Le verre.

Le verre ordinaire est formé de silice sous forme de sable fondu. Comme la température de fusion du sable est très élevée (1 600 à 1 700 ° C), on ajoute des oxydes qui ont pour but d'abaisser la température de fusion du mélange. A l'extrême, on obtient des verres qui fondent à 600° C et qui peuvent être utilisés pour enrober certains composants.

Pour le diélectrique des condensateurs, on a retenu un verre au boro-silicate à 4 % d'oxydes ayant un angle de pertes très faible (10.10^{-4}) et une constante diélectrique de 4. Il a une rigidité diélectrique de 20 kV/mm et il peut être utilisé jusqu'à 200° C. Sa dilatation thermique est faible et son coefficient de température est légèrement positif.

Des essais sont en cours avec des verres aux oxydes de plomb, de potassium et de sodium (ε : 6,5 à 6,8) et avec des verres aux oxydes de baryum et de strontium.

6.2. — La fabrication.

Par extrusion, on confectionne un ruban de verre de la largeur du condensateur à fabriquer et de 10 à 12 μ d'épaisseur (fig. 4 - 26). Ce diélectrique est parfait, car il ne contient pas de défauts, ni de trous microscopiques.

On découpe le ruban en longueurs permettant de construire de dix à quarante pièces, selon leur valeur. On intercale une série de feuilles d'aluminium débordant légèrement du ruban de verre sur un côté (*a*). Puis, on pose un second ruban de verre sur le premier, une deuxième série de feuilles d'aluminium débordant du côté opposé et, enfin, un troisième ruban de verre (*b*). Cet empilage suffit pour la confection des condensateurs de faible valeur de capacité. Pour les valeurs élevées, on continue l'empilage des rubans de verre et des feuilles d'aluminium jusqu'à obtenir la capacité désirée.

L'empilage étant terminé, on le met sous une pression mécanique d'environ 20 g/cm² dans un four. Pour des électrodes en aluminium la cuisson a lieu sous atmosphère d'azote. Pour des électrodes en or, la cuisson peut s'effectuer à l'air. Le verre se ramollit, l'air contenu entre les lames est chassé par la pression mécanique. Puis, on élève la température jusqu'au point de fusion du verre (600-650° C) pour obtenir une masse compacte et étanche.

Après refroidissement, on soude électriquement les fils de sortie sur la partie débordante des électrodes (*c*). Il faut que ce fil se soude bien à l'aluminium, qu'il ait le même coefficient de dilatation que le verre et qu'il puisse être soudé à l'étain au circuit extérieur. On choisit généralement un fil plaqué à âme en fer revêtu de nickel ou d'or.

Puis on découpe les condensateurs unitaires (*d*). On place chacun entre deux feuilles de verre, un peu plus épaisses et qui débordent de tous les côtés du condensateur. Ce verre a un point de fusion inférieur à celui du diélectrique.

Le condensateur est à nouveau passé au four. Le verre se soude et l'enrobe complètement. On obtient ainsi un condensateur monobloc absolument étanche.

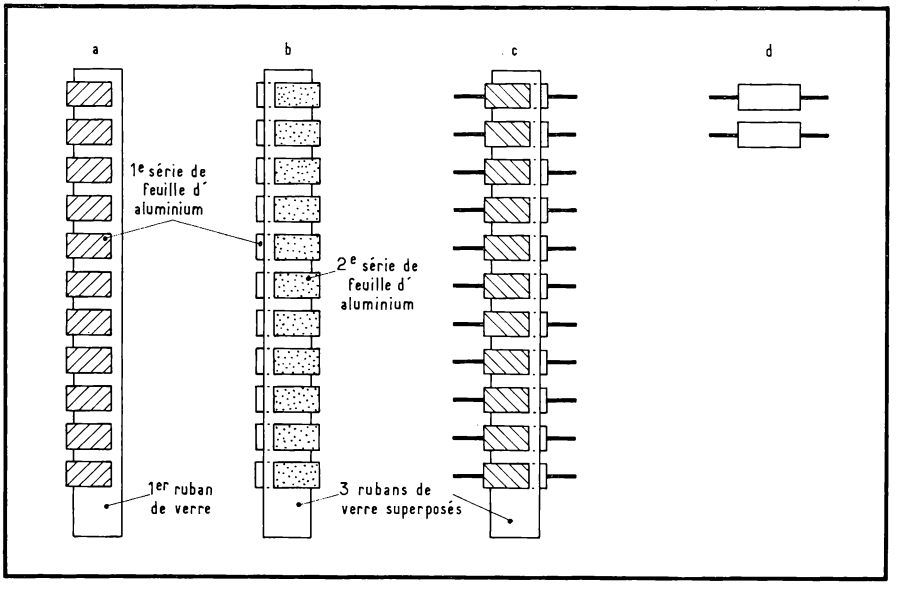


Fig. 4 - 26. — Fabrication schématique des condensateurs au verre.

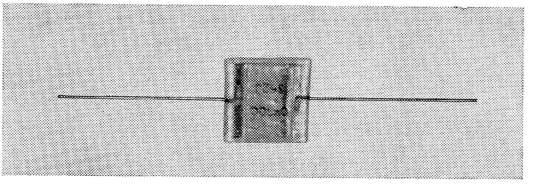


Fig. 4 - 27. — Condensateur en verre monobloc (Sovirel).

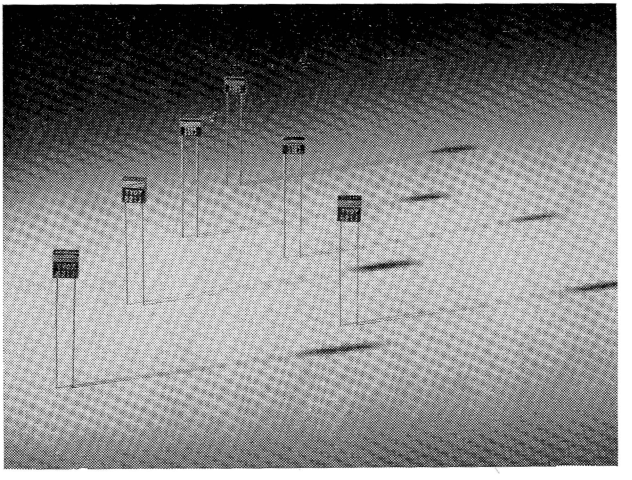


Fig. 4 - 28. — Condensateurs au verre, haute stabilité, haute fiabilité, présentation en boîtier moulé, sorties dorées (Sovirel).

Les sorties ne peuvent pas être arrachées. Les variations de pression et les vibrations sont sans effet (fig. 4 - 27).

Il est également possible d'enrober le condensateur dans un boîtier plastique. Les sorties peuvent être axiales ou radiales (fig. 4 - 28).

Des essais sont en cours pour l'utilisation d'électrodes en or. Le cuivre ne peut être employé car il s'oxyde à la cuisson. L'argent n'a pas donné de bons résultats non plus car il diffuse à 600° C donnant naissance à des silicates jaunes d'argent diminuant l'isolement.

6.3. — Les caractéristiques.

— COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Il est de $+ 140 \pm 25.10^{-6}$/° C entre — 55° et + 125° C et entre 100 kHz et 1 MHz.

— ANGLE DE PERTES.

Il est compris entre 10 et 30.10^{-4} selon les modèles, ce qui est légèrement inférieur au mica.

— ISOLEMENT.

Il décroît d'une puissance de 10 par 30° C. Cependant à 125° C, il est encore supérieur à 500 MΩ/μF.

— TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

± 20 %, ± 10 %, ± 5 %, ± 2 %, ± 1 %.

— NORMES.

A ce jour il n'existe pas de normes françaises pour ce type de condensateur. Se reporter à la norme U.S.A. : MIL C. 11.272 B.

6.4. — Les différents modèles.

6.4.1. — *MODÈLES STANDARDS.*

Monoblocs en verre.
Capacité : entre 1 pF et 10 nF (selon la tension).
Tension de service : 300 et 500 V.
Plage de température : — 55° et + 125° C sans aucune réduction de tension.
Utilisation : circuits H.F.

6.4.2. — *MODÈLES HAUTE FIABILITÉ.*

Enrobés plastique.
Capacité : entre 1 pF et 10 nF.
Tension de service : 300 V.
Plage de température : — 55°, + 125° C.
Utilisation : circuits H.F.
Exemples de dimensions : 560 pF, longueur 7,6 mm, largeur 5,1 mm, épaisseur 3 mm ; 10 nF, longueur 22,9 mm, largeur 17,8 mm, épaisseur 5 mm (*Sovirel*).

6.4.3. — *MODÈLES DE PUISSANCE.*

Capacité : jusqu'à 0,1 µF.
Tension de service : jusqu'à 6 000 V (puissance réactive à 1 MHz maximale : 7,8 kVAR).
Plage de température : — 55° et + 125° C.
Utilisation : circuits H.F. de puissance.

7. — LES CONDENSATEURS CÉRAMIQUE.

Il existe un grand nombre de types différents de condensateurs céramique pour toutes les applications H.F.

7.1. — Les céramiques pour condensateurs.

Ce sont des mélanges complexes de silicate de magnésie (talc), d'alumine, de corindon, de zircon, de feldspath auxquels on ajoute, selon la constante diélectrique désirée, un ou plusieurs des corps suivants : titane, baryum, calcium, magnésie, etc...

Le mélange est broyé finement, puis calciné à une température inférieure au point de fusion, afin d'oxyder toute la matière organique et de réduire à l'état d'oxyde les carbonates, les chlorures ou les sulfates présents dans la pâte. La masse est à nouveau réduite en poudre et mélangée à des liants aqueux (gommes, huiles) ou organiques (argile), puis moulée sous pression en forme convenable.

Les pièces sont cuites au four (1 200° à 1 400° C) sous atmosphère oxydante. On obtient une densification suffisante supprimant toute porosité.

Les céramiques sont stables dans le temps, elles résistent bien aux variations de température et aux efforts mécaniques. Elles sont inattaquables à l'humidité et aux acides. Leur coefficient de dilatation est faible ce qui permet de donner une grande précision aux pièces.

Selon leur composition, on obtient des céramiques très différentes du point de vue caractéristiques ; elles sont classées en deux groupes.

Les céramiques du *groupe I* sont stables et leur constante diélectrique est comprise entre 5 et 220. Ce sont des titanates de magnésie ou de calcium.

Leurs principales caractéristiques sont :

Résistance spécifique : 10^8 à 10^{15} Ω.cm.

Coefficient de température : + 130 à $-3\,000.10^{-6}$/° C.

Angle de pertes : 10.10^{-4}.

Rigidité diélectrique : 4 à 10 kV.mm.

Ces céramiques servent à construire des condensateurs précis et stables de haute qualité.

Les céramiques du *groupe II* sont instables et leur constante diélectrique est très élevée, jusqu'à 10 000 et même 15 000. Ce sont des titanates et zirconates de baryum ou de strontium. Leur coefficient de température est très irrégulier et leurs pertes sont plus élevées.

Leurs principales caractéristiques sont :

Résistance spécifique : 10^6 à 10^{15} Ω.cm.

Coefficient de température : variable et instable.

Angle de pertes : 100.10^{-4}.

Rigidité diélectrique : 4 à 6 kV.mm.

Constante diélectrique : 1 000 à 15 000.

Ces céramiques sont utilisées pour les condensateurs de découplage miniatures dont les tolérances sont larges et dont la stabilité n'est pas recherchée.

7.2. — La fabrication.

Les pièces sont moulées et cuites au four à leurs formes définitives. Ce sont des tubes de différentes dimensions, des plaquettes, des perles pour les condensateurs de faible puissance. Ce sont des disques, des pots, des assiettes et des tubes avec collerettes pour les condensateurs de grande puissance.

Les électrodes sont déposées directement sur la céramique par argenture des surfaces en regard. Il s'agit d'une argenture chimique obtenue par réduction de l'oxyde d'argent en poudre en suspension dans un liquide. Ce mélange est déposé sur la céramique parfaitement dégraissée, soit au pistolet à air comprimé, s'il est nécessaire de ne pas argenter toute la pièce, soit au trempé dans le cas contraire.

La réduction a lieu au four entre 700° et 800° C.

L'argenture doit adhérer parfaitement à la céramique pour qu'on obtienne de bons résultats.

Les connexions sont toujours soudées aux électrodes car il faut une faible résistance série pour avoir un bon comportement en H.F.

Enfin, le condensateur est revêtu d'une couche de protection qui peut être soit une peinture cuite au four, soit un plastique, soit enfin un émail synthétique cuit à haute température. Les surfaces de céramique non argentées des condensateurs de puissance sont vitrifiées.

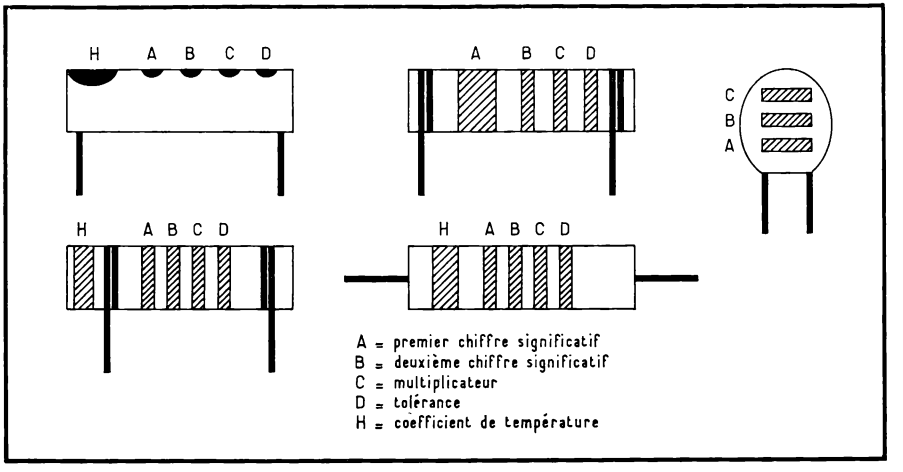


Fig. 4 - 29. — Code de marquage des condensateurs céramique.

Il faut, en effet, protéger la couche d'argent de l'action de l'humidité et des agents extérieurs.

Selon qu'il s'agit d'un matériel « grand public » ou d'un matériel professionnel tropicalisé, la protection est différente et plus ou moins complète.

7.3. — Les caractéristiques des condensateurs du groupe I.

— COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

On a vu qu'il est fonction de la constante diélectrique. Il est de + 100 à + 130.10^{-6}/° C pour $\varepsilon = 5$ et de — $3\,000.10^{-6}$/° C pour $\varepsilon = 220$. C'est-à-dire qu'il est légèrement positif pour les céramiques à faible constante diélectrique, puis il devient nul et de plus en plus négatif au fur et à mesure que ε augmente. La normalisation couvre la plage de + 100 à — 750.10^{-6}/° C avec des tolérances de plus en plus serrées selon la classe du condensateur.

ANGLE DE PERTES.

Il est faible et voisin de 10.10^{-4} entre — 55° et + 85° C et de 1 à 3 000 MHz. Les pertes augmentent à partir de 120° C, ce qui limite leur utilisation bien que la céramique, l'argenture et le revêtement puissent tenir à des températures bien supérieures.

Ces condensateurs ne sont pas conseillés pour une utilisation en courant continu et en B.F., car les pertes croissent au-dessous de 1 MHz, pour devenir importantes au-dessous de 20 kHz. Au-dessus de 50 MHz, il convient de choisir les modèles spéciaux dont les dimensions sont plus réduites et dont les formes et les sorties sont prévues afin d'obtenir l'impédance la plus faible.

ISOLEMENT.

La résistance d'isolement décroît lorsque la température augmente. Elle est encore de 10^{15} Ω.cm à 100° C et de 10^{12} Ω.cm à 200° C. La résistance superficielle est d'au moins 50 000 MΩ avec de la céramique vitrifiée.

RIGIDITÉ DIÉLECTRIQUE.

Ce type de céramique supporte bien la tension sans création d'arc. On compte sur une tension de service comprise entre 1,5 et 3 kV.mm.

NORMES.

Condensateurs à diélectrique céramique du type I :
F.N.I.E. : 028.
C.E.I. : 108.
U.T.E. : C 93.130.
C.C.T. : 02.02.

Le *marquage est normalisé* (fig. 4 - 29) selon le code des couleurs suivant :

Couleur	Coef. de Temp. H	Capacité		Tolérance D	
		Chiffre A — B	Multiplicateur C	$C_n > 10$ pF %	$C_n \leqslant 10$ pF (pF)
noir	0	0	1	20	2
marron ...	— 33	1	10	1	0,1
rouge	— 75	2	100	2	
orange	— 150	3	1 000		
jaune	— 220	4			
vert	— 330	5		5	0,5
bleu	— 470	6			
violet	— 750	7			
gris		8	0,01		0,25
blanc		9	0,1	10	1
or	+ 100				

TOLÉRANCES NORMALES.

Au-dessus de 10 pF : ± 20 %, ± 10 %, ± 5 %, ± 2 %.
Au-dessous de 10 pF : ± 1 pF, ± 0,5 pF, ± 0,25 pF, ± 0,1 pF.
Série E 6, pour les tolérances : ± 20 %, ± 1 pF, ± 0,5 pF.
Série E 12, pour les tolérances : ± 10 %, ± 5 %, ± 2 %, ± 0,25 pF, ± 0,1 pF.

7.4. — Les différents modèles de condensateurs du groupe I.

7.4.1. — *CONDENSATEURS TUBULAIRES.*

Le tube de céramique, de dimensions et d'épaisseur convenables en fonction de la valeur de capacité à obtenir, de la tension de service et de la nature de la céramique utilisée, est argenté (fig. 4 - 30). Mais comme les fils de sortie sont enroulés et soudés à l'extérieur du tube, il faut que la métallisation intérieure soit poursuivie par la tranche vers l'extérieur. Un cache interrompt la métallisation extérieure pour assurer la séparation des deux électrodes. L'ensemble est protégé par une peinture ou par un enrobage plastique.

Il existe une très grande variété de condensateurs tubulaires du groupe I, selon leur utilisation dans les circuits H.F. et selon qu'il s'agit de matériel grand public ou professionnel.

On peut différencier les grandes catégories suivantes :

CONDENSATEURS DE CIRCUIT ET DE LIAISON.

Le constructeur se réserve le droit d'utiliser n'importe quelle céramique du groupe I dont le coefficient de température est compris entre + 100 et — 750.10^{-6}/° C. C'est-à-dire qu'une même dimension de tube peut couvrir une gamme de valeurs étendue, en variant la nature de la céramique, selon sa constante diélectrique.

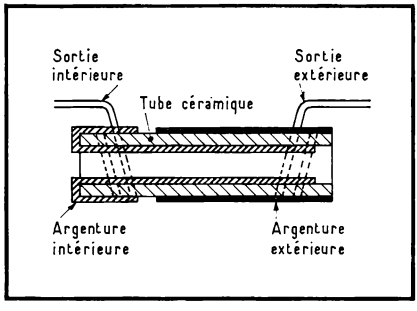


Fig. 4 - 30. — Constitution schématique d'un condensateur tubulaire.

Capacité : entre 0,5 et 1 000 pF (selon la tension et les modèles) .

Tension de service : 250 et 500 V.

Utilisation : tous les circuits H.F. faible puissance, sauf la correction de dérive et l'accord de précision.

CONDENSATEURS DE PRÉCISION.

Le constructeur garantit le coefficient de température d'une façon très précise entre + 100 et — 750.10^{-6}/° C.

Capacité : entre 0,5 et 240 pF pour + 100.10^{-6}/° C ; et entre 1 et 1 000 pF pour — 750.10^{-6}/° C.

Tension de service : 250 et 500 V.

Utilisation : correction de la dérive des circuits oscillants en fonction de la température, tous les circuits nécessitant des condensateurs précis et de coefficient de température connu.

CONDENSATEURS MOYENNE PUISSANCE DE PRÉCISION.

Le tube est plus épais (2 mm) et ces condensateurs supportent une tension et une puissance plus élevées.

Capacité : 2,2 à 390 pF (selon la céramique).

Tension de service : continu + H.F. crête : 1 500 V ; H.F. pure : 600 V.

Intensité H.F. maximale : 1,5 A.

Utilisation : circuits H.F. de moyenne puissance.

CONDENSATEURS DE PUISSANCE.

Le tube est encore plus épais et de dimensions importantes (fig. 4 - 31). Les extrémités du tube sont terminées par des bords profilés destinés à augmenter la longueur des lignes de force entre les armatures et pour éviter les contournements et les effluves. L'armature extérieure est reliée à la masse par un collier qui sert également à fixer le condensateur.

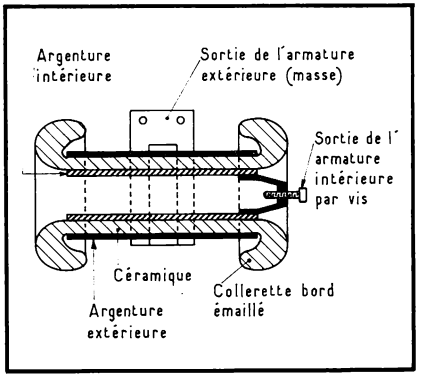


Fig. 4 - 31. — Constitution schématique d'un condensateur tubulaire de puissance.

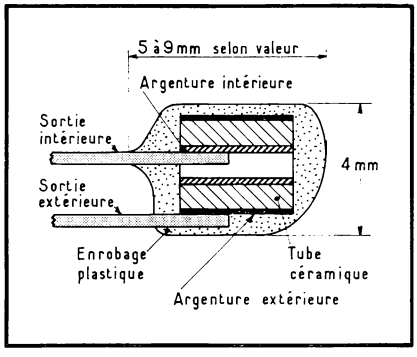


Fig. 4 - 32. — Condensateur perle.

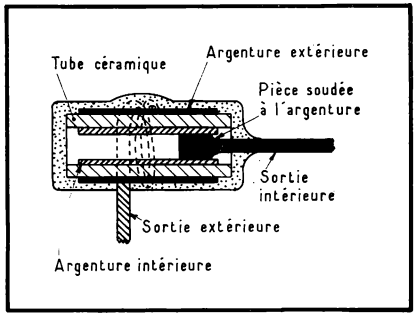


Fig. 4 - 33. — Condensateur pour impulsions.

L'argenture intérieure aboutit à une borne de grande dimension placée à une extrémité du tube. Il ne s'agit, ici, que de matériel professionnel précis et bien protégé.

La puissance réactive et l'intensité efficace maximales varient en fonction de la fréquence. Les constructeurs publient une courbe pour chacun de leurs modèles.

Capacité : 500 à 2 000 pF (selon la céramique).

Tension de service : continu + H.F. crête : 8 500 V.

Intensité H.F. maximale : 50 A à 50 MHz pour un échauffement de 45 °C, température maximale du condensateur 105° C.

Utilisation : circuits H.F. de puissance.

CONDENSATEURS « PERLE ».

Ce sont des condensateurs tubulaires miniatures ayant une fréquence de résonance très élevée (fig. 4 - 32).

Capacité : 1,5 à 18 pF (± 20 %).

Tension de service : 500 V.

Plage de température : — 40° à + 85° C.

Utilisation : circuits à très haute fréquence.

CONDENSATEURS POUR IMPULSIONS.

Le tube est plus épais, les sorties offrent une impédance faible et l'ensemble est très bien isolé de façon à supporter les impulsions brèves de tension élevée (fig. 4 - 33).

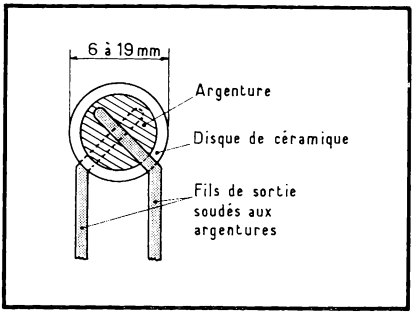


Fig. 4 - 34. — **Condensateur disque.**

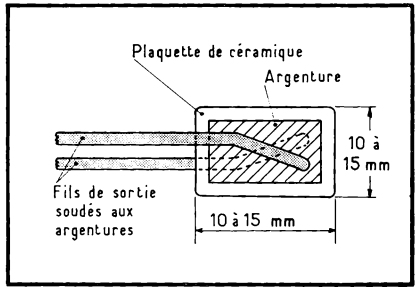


Fig. 4 - 35. — **Condensateur plaquette.**

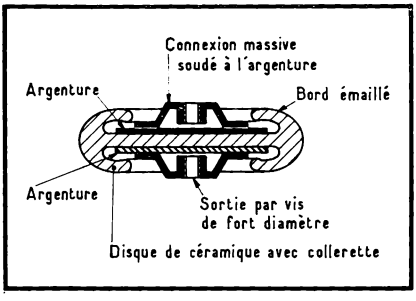


Fig. 4 - 36. — **Condensateur assiette de puissance.**

Capacité : 10 à 200 pF (± 10 %).
Tension de service : entre 500 et 5 000 V de crête.
Utilisation : circuits à impulsions.

7.4.2. — *CONDENSATEURS DE FORMES DIVERSES.*

On obtient de tels condensateurs en métallisant les deux faces d'un disque de céramique de forme et de dimensions variables en fonction de l'utilisation. La protection est différente s'il s'agit d'un matériel grand public ou professionnel. Il existe également une très grande variété de modèles dont on ne retiendra que l'essentiel.

CONDENSATEURS « DISQUE ».

Ce sont des condensateurs précis et stables (fig. 4 - 34) ayant une impédance faible aux fréquences élevées. En effet, le disque est la forme qui permet d'obtenir la plus forte capacité pour le plus faible encombrement et les pertes les plus faibles en U.H.F.

Il existe des modèles normaux : 1,5 à 220 pF, T_s : 500 V ; des modèles « haute tension » : 47 à 100 pF, T_s : 3 000 et 6 000 V ; des modèles « haute température » : 1 à 470 pF, T_s : 500 V à 150° C ; des modèles « pastille » : 0,5 à 12 pF, T_s : 500 V.

CONDENSATEURS « PLAQUETTE ».

Ce type (fig. 4 - 35) est peu utilisé avec de la céramique du groupe I. A signaler cependant un modèle pour correction de dérive (capacité : 33 à 1 000 pF, T_s : 70 et 200 V).

CONDENSATEURS DE PUISSANCE « ASSIETTE ».

C'est un disque de céramique épais dont les bords ont été profilés pour augmenter la distance entre les électrodes et éviter les contournements et les effluves (fig. 4 - 36). Les bornes, de grandes dimensions, sont soudées sur les électrodes.

La hauteur des bornes dépasse celle de la collerette afin de pouvoir brancher ces condensateurs en série, si cela est nécessaire. De par leur forme et leur construction, ils offrent une résistance série négligeable et ils peuvent être employés à des fréquences très élevées.

La puissance réactive qu'ils peuvent absorber est limitée uniquement par la température de la céramique (max. 105° C). S'ils sont refroidis par un courant d'air forcé, la puissance admissible peut être augmentée de 3 à 5 fois. Des dispositifs de sécurité doivent être prévus en cas d'arrêt de la ventilation.

De même la tension maximale ne doit pas être dépassée. Cependant, il existe des condensateurs prévus pour être immergés dans l'huile minérale ce qui permet de multiplier par 5 ou par 10, selon les modèles, la tension de service maximale dans l'air.

L'échauffement d'un condensateur provient des pertes diélectriques dans la céramique et des pertes par effet Joule dans les armatures. Or, ces pertes varient en fonction de la fréquence (fig. 4 - 37) et limitent la puissance réactive admissible.

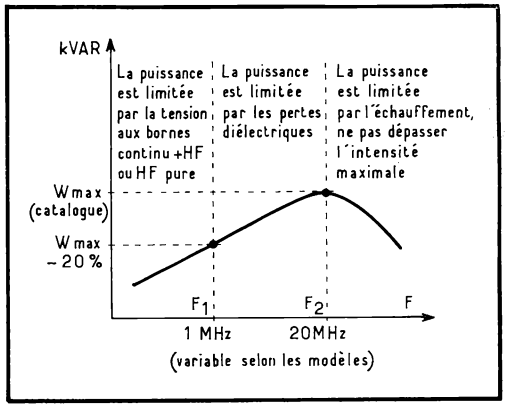


Fig. 4 - 37. — Variations de la puissance réactive admissible en fonction de la fréquence.

En dessous de la fréquence F_1, qui est variable selon les modèles (aux environs de 1 MHz), la puissance H.F. admissible est limitée par la tension. Il ne faut pas dépasser la tension indiquée par le fournisseur.

Entre F_1 et F_2 (environ 1 et 20 MHz), la puissance est limitée par les pertes diélectriques. C'est pour F_2 qu'est donnée la puissance réactive maximale du catalogue. Au-dessus de F_2, l'échauffement provient surtout de l'effet Joule, et il ne faut pas dépasser l'intensité maximale indiquée.

Capacité : 8 à 500 pF (selon les modèles).

Tension de service : dans l'air : 5 000 V (continu + H.F. crête) ; dans l'huile : de 10 000 à 17 000 V.

Intensité H.F. : entre 5 et 40 A.

Utilisation : circuits de puissance entre 100 kHz et 1 000 MHz.

CONDENSATEURS DE PUISSANCE EN « POTS ».

Ils sont prévus pour les mêmes usages que les condensateurs tubulaires de puissance, ou que les condensateurs « assiette ». C'est un tube fermé à une extrémité (fig. 4 - 38). L'aération intérieure se fait moins bien, et le refroidissement par air forcé n'apporte pas de gain appréciable.

Capacité : 100 à 1 200 pF (selon les modèles).

Tension de service : 3 000 à 8 500 V (continu + H.F. crête).

Intensité H.F. : entre 10 et 25 A.

Utilisation : circuits de puissance H.F.

7.5. — Les caractéristiques des condensateurs du groupe II.

COEFFICIENT DE TEMPÉRATURE.

Plus la constante diélectrique est importante, plus le coefficient de température est élevé et irrégulier. Sa valeur maximale se situe à la température du point de Curie. Les mélanges des produits constituant la céramique sont étudiés afin de rendre la courbe moins irrégulière dans la plage de fonctionnement.

Ces céramiques sont sensibles à la tension aux bornes et elles possèdent des propriétés ferroélectriques qui augmentent les pertes.

C'est pourquoi le coefficient de température n'est jamais indiqué et les tolérances sur la capacité larges.

ANGLE DE PERTES.

Il est également variable en fonction de la température, de la fréquence et de la tension aux bornes. Il est généralement voisin de 100.10^{-4} dans les conditions normales d'emploi. La norme fixe une valeur maximale élevée (300.10^{-4}) de façon à tenir compte des différents paramètres.

ISOLEMENT.

Il est plus faible que celui des condensateurs du groupe I.

Il est variable en fonction de la température et de la tension.

Un condensateur bien construit a une résistance d'isolement supérieure à 10 000 MΩ.

RIGIDITÉ DIÉLECTRIQUE.

Par suite de la valeur élevée de la constante diélectrique, la pression électrostatique en régime d'impulsions risque de fendre le diélectrique. Il y a lieu, dans ce cas, de placer une résistance en série avec le condensateur pour réduire la pression à une valeur compatible avec la céramique utilisée. La rigidité diélectrique diminue rapidement au-dessus de 100° C. Pour la fabrication, on établit la tension de service entre 1 et 2 kV.mm.

NORMES.

Condensateurs à diélectrique céramique du groupe II :

F.N.I.E. : 029 et 030.

C.C.T. : 02.04.

TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

± 20 %, — 20 + 50 %, 0 + 100 % (série E 6).

TENSIONS DE SERVICE NORMALISÉES.

35, 63, 100, 160, 250, 400, 500 V.

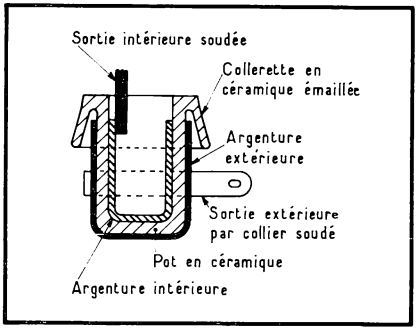


Fig. 4 - 38. — Condensateur en pot.

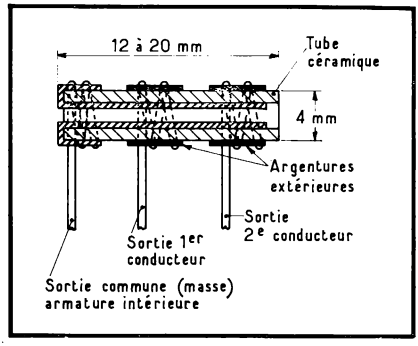


Fig. 4 - 39. — Condensateur subminiature double ou triple.

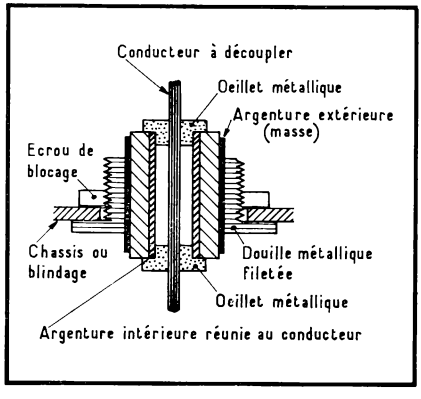


Fig. 4 - 40. — Condensateur de traversée (by-pass).

7.6. — Les différents modèles.

7.6.1. — *CONDENSATEURS TUBULAIRES.*

Ils sont très petits, on peut même prévoir plusieurs condensateurs sur le même tube (fig. 4 - 39). Il existe des modèles pour circuits transistorisés à faible tension de service (35 et 63 V) dont l'épaisseur du tube ne dépasse pas 0,1 mm.

Série ultra miniature :

Capacité : entre 330 pF et 10 nF.

Tension de service : 250 et 500 V.

Utilisation : découplage H.F.

Série double ou triple miniature :

Capacité : doubles 2 × 470 pF à 2 × 2 200 pF ; triples 3 × 470 pF à 3 × 1 000 pF.

Tension de service : 250 et 400 V.

Utilisation : découplage d'un étage H.F. à lampe.

7.6.2. — *CONDENSATEURS DE TRAVERSÉE* (by-pass).

Ils servent à découpler un fil d'alimentation lors de la traversée des châssis ou des blindages (fig. 4 - 40).

Le tube de céramique est métallisé intérieurement et extérieurement. Une douille métallique filetée est soudée à l'armature extérieure. Elle permet de fixer le condensateur dans un trou du châssis au moyen d'un écrou. L'armature intérieure est reliée au fil d'alimentation par deux œillets métalliques soudés. Le diamètre du fil central dépend de l'intensité qui le traverse.

Il existe des modèles miniatures qui doivent être soudés au châssis.

CONDENSATEURS DE TRAVERSÉE MINIATURE.

Capacité : 1 à 2 nF.
Tension de service : 250 et 500 V.

CONDENSATEURS DE TRAVERSÉE NORMAUX.

Capacité : 100 pF à 2,2 nF (selon les modèles).
Tension de service : 500 V.
Intensité dans le conducteur central : de 20 A à 80 A.

7.6.3. — *CONDENSATEURS DIVERS.*

CONDENSATEURS « DISQUE ».

Les modèles haute tension sont surtout utilisés en antiparasitage car leurs pertes à 50 Hz sont acceptables.

Il a été créé récemment des modèles basse tension pour le découplage des circuits transistorisés.

Modèles haute tension :
Capacité : 470 pF à 47 nF.
Tension de service : 250 et 500 V.

Modèles basse tension :
Capacité : 22 nF à 0,47 µF.
Tension de service : 12 à 63 V.

CONDENSATEURS « PLAQUETTE ».

Ils complètent les condensateurs tubulaires de découplage jusqu'à 0,1 µF. L'épaisseur minimale des plaquettes est de 0,05 mm. On fabrique également des plaquettes multiples contenant 2 ou 3 condensateurs (fig. 4 - 42). Ils sont généralement prévus pour des faibles tensions de service.

Capacité : condensateurs simples : 470 pF à 0,1 µF ; condensateurs doubles : 470 pF à 10 nF ; condensateurs triples : 470 pF à 4,7 nF.

Tension de service : de 35 à 160 V.

8. — LES CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES A L'ALUMINIUM.

8.1. — Généralités.

Lorsqu'on réunit une source à deux électrodes d'aluminium placées dans une éprouvette remplie d'une solution d'acide borique, on réalise un condensateur électrolytique (fig. 4 - 43). Un courant assez intense prend naissance dans le circuit. L'électrolyse de la solution d'acide borique détermine l'apparition d'ions d'oxygène sur l'anode qui s'oxyde. Une couche très mince d'alumine (Al_2O_3) se dépose sur l'anode d'une façon régulière. L'épaisseur est fonction de

la tension de la source. Le courant dans le circuit diminue progressivement et devient inférieur à 1 mA. Si on augmente la tension de la source, le courant croît à nouveau, l'épaisseur de la couche d'alumine augmente, puis le courant redevient très faible.

Il s'est donc créé un condensateur dont l'armature positive est constituée par l'anode ; le diélectrique c'est l'alumine, et la seconde électrode est formée par l'électrolyte et par la cathode. Il ne faut pas commettre l'erreur qui consiste à croire que c'est l'électrolyte qui est le diélectrique. Notons, de plus, qu'il s'agit d'un condensateur polarisé.

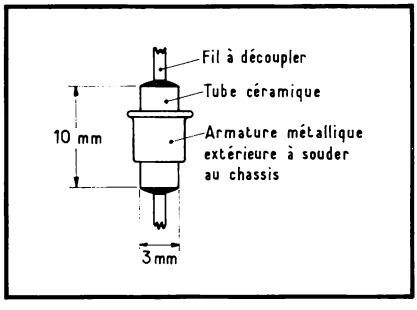


Fig. 4 - 41. — Condensateur de traversée miniature.

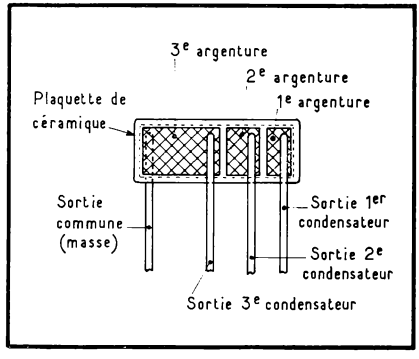


Fig. 4 - 42. — Condensateur plaquette multiple.

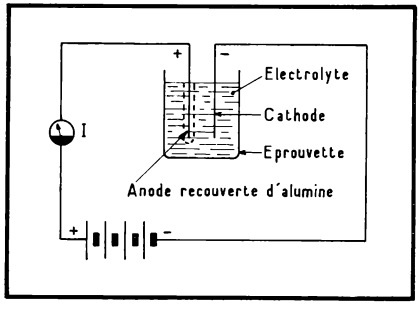


Fig. 4 - 43. — Schéma de la formation d'un condensateur électrolytique.

L'alumine est un très bon isolant qui possède une constante diélectrique de 9. Il est utilisable sous de très faibles épaisseurs, ce qui permet d'obtenir de fortes capacités pour de faibles surfaces d'électrodes. On compte 10^{-7} cm/V de tension de formation, ce qui donne 0,7 μ pour une tension de service de 500 V et 0,01 μ pour 6 V.

8.2. — La fabrication.

8.2.1. — *PRINCIPE.*

On adopte le même principe de fabrication que celui des condensateurs au papier (ce qui est bien loin de l'expérience de laboratoire dont il a été question au paragraphe précédent).

On bobine ensemble (fig. 4 - 44) :

— l'anode constituée par une bande d'aluminium très pur (99,9 à 99,99 %) déjà recouverte d'une couche d'alumine d'épaisseur convenable. Elle peut être lisse ou gravée ;

— le séparateur constitué par au moins deux bandes de papier spécial ;

— la cathode constituée par une bande d'aluminium de même pureté que l'anode mais plus mince et non traitée ;

— le second séparateur identique au premier.

8.2.2. — *LE PAPIER SPÉCIAL.*

Deux qualités de papier sont possibles : le papier « chiffon », avec des pâtes de coton blanc très bien lavées pour éliminer le chlore, et le papier « kraft », à la pâte de bois écru comme pour les condensateurs au papier. Leur épaisseur est plus importante que pour ces derniers, elle est comprise entre 27 et 90 μ.

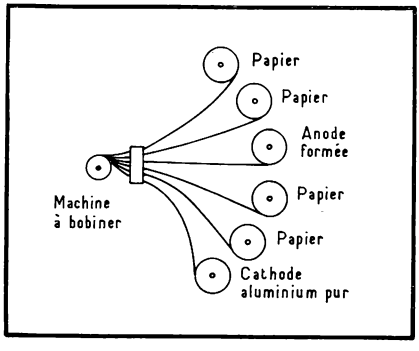


Fig. 4 - 44. — Principe de la fabrication des condensateurs électrolytiques.

Il est prévu deux porosités différentes pour chaque qualité de papier, l'un assez poreux (type A) et le second moins poreux (type standard). Les fabricants ont ainsi quatre variantes à leur disposition pour leurs différents modèles.

Le papier pour condensateur électrolytique est donc plus épais et plus poreux que celui prévu pour les condensateurs au papier, c'est pourquoi on l'appelle parfois un « buvard ». C'est nécessaire pour absorber et retenir l'électrolyte.

8.2.3. — *PRÉPARATION DE L'ANODE.*

L'anode peut être une bande d'aluminium pur oxydée (20 à 40 μ d'épaisseur). C'est réellement le cas pour les condensateurs ayant un service dur à assurer, tant par la plage de température ambiante que par la valeur de la tension alternative superposée. On dit qu'il s'agit d'un condensateur à *anode lisse.*

Pour diminuer le volume des condensateurs, il faut chercher à augmenter la surface de l'anode sans toucher à son volume.

Si, par un procédé chimique, on grave la bande d'aluminium (120-130 μ), on multiplie sa surface par 15 (fig. 4 - 45).

On obtient ainsi des condensateurs miniatures dont la résistance série est un peu plus élevée que celle des condensateurs à anode lisse.

Le dépôt d'alumine comble les plus fines gravures et le gain réel est fonction de l'épaisseur de la couche, donc de la tension de service.

La couche, pour 3 V de tension de service, est extrêmement mince, le gain en surface est de 12 environ. Pour 30 V, la couche est un peu plus épaisse et le gain est encore de 8,5. Enfin, pour 550 V, le gain n'est plus que de 4,5, ce qui est toujours appréciable.

La bande d'aluminium lisse ou gravée, parfaitement propre et dégraissée passe dans une cuve de formation. L'électrolyte peut contenir un ou plusieurs des acides suivants : acide citrique, acide tartrique, acide borique. Le plus souvent on adopte un mélange d'eau distillée, d'acide borique et de borate de sodium ou d'ammonium.

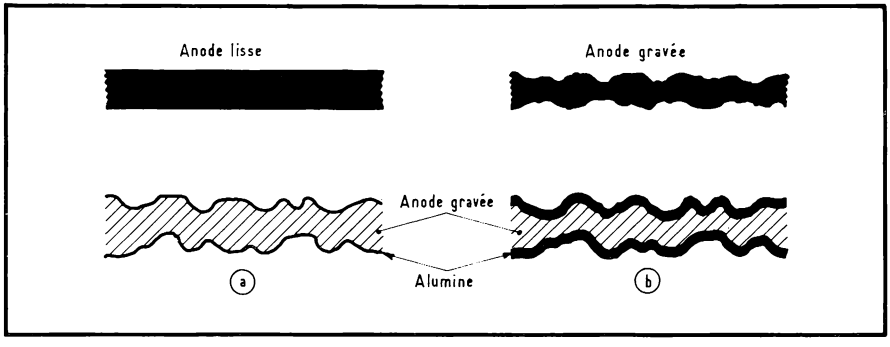


Fig. 4 - 45. — Constitution schématique d'une anode gravée par rapport à une anode lisse.

Le rouleau d'aluminium est placé sur un support métallique qui est relié au pôle positif d'une alimentation de tension variable.

Le pôle négatif est branché sur la cuve. La bande traverse une ou plusieurs cuves de formation remplies d'électrolyte chaud (60° C à 70° C) et portées à des tensions croissantes. Puis, la bande est séchée et s'enroule sur une bobine à l'autre extrémité du bain.

La tension de formation est très légèrement supérieure à la tension maximale d'essai, c'est-à-dire environ 20 % au-dessus de la tension de service. Cela, pour tenir compte de la chute de tension dans l'électrolyte et de la marge de sécurité indispensable. En effet, le courant de fuite croît très rapidement lorsque la tension appliquée au condensateur dépasse la tension de service (fig. 4 - 46).

La tension de formation ne peut pas dépasser 650 V, car, au-dessus, une scintillation prend naissance. Ce sont des arcs minuscules de disruption de l'alumine. C'est une limitation physique absolue de ce type de condensateur. De ce fait, la tension de service maximale est de 500 V.

8.2.4. — *BOBINAGE.*

L'anode formée, les séparateurs et la cathode sont bobinés ensemble d'une façon classique (fig. 4 - 44).

Ce type de condensateur ne fonctionne qu'aux fréquences basses, il n'est donc pas nécessaire de réduire son inductance. Les sorties sont constituées en

incisant et en pliant les deux électrodes. Généralement la sortie de cathode est faite du côté opposé de celle de l'anode, afin d'éviter les court-circuits.

8.2.5. — *IMPRÉGNATION ET FINITION.*

Le condensateur bobiné doit ensuite être imprégné.

Mais, au lieu d'utiliser à cet effet de la cire ou de l'huile minérale, on emploie un électrolyte composé de glycol, d'acide borique et de borate d'ammonium. Le glycol, en effet, ne sèche pas dans le temps. L'électrolyte peut être assez pâteux pour les condensateurs à anode lisse. En revanche, il doit être plus fluide pour les condensateurs à anode gravée, afin qu'il atteigne toute la surface de l'alumine.

L'imprégnation s'effectue comme pour les condensateurs au papier. On la fait précéder d'un séchage soigné en étuve et elle est effectuée à chaud (100° à 120° C) dans une cuve sous vide.

Les condensateurs sont ensuite placés dans un boîtier d'aluminium et fermés, soit par un produit d'obturation classique, soit par une rondelle de néoprène ou de céramique sertie à l'extrémité du tube. Les sorties se font par fils ou par cosses.

Avant d'être stockés, les condensateurs sont essayés, puis soumis à une post-formation de plusieurs jours, afin de réduire leur courant de fuite.

8.3. — Les caractéristiques.

— ANGLE DE PERTES.

Les pertes dans un condensateur électrolytique proviennent :

— de la conductibilité de la couche d'oxyde (isolement) ;

— des pertes dans le diélectrique qui augmentent avec la fréquence et limitent ce type de condensateur à 1 000 Hz ;

— des pertes par effet Joule dans l'électrolyte (résistance série) ;

— des pertes dues à la décomposition de l'électrolyte.

La somme de ces quatre causes donne l'angle de pertes du condensateur. On sait construire des condensateurs ayant un angle de pertes de 2 % (200.10^{-4}), mais ils sont trop fragiles à cause de la faible épaisseur des papiers séparateurs. On préfère adopter une valeur plus élevée, de l'ordre de 10 % ($1\,000.10^{-4}$), pour avoir une sécurité de fonctionnement plus grande.

A 100 Hz, la normalisation prévoit une valeur maximale de 35 % pour 6 et 12 V, 25 % pour 25 V, 15 % entre 50 et 150 V, et 12 % au-dessus de 150 V.

— ISOLEMENT (COURANT DE FUITE).

Le courant de fuite est provoqué par l'intensité qui traverse le condensateur, déterminée par sa résistance d'isolement.

Lorsqu'un condensateur est stocké pendant un certain temps, il y a solution lente de la couche d'oxyde dans l'électrolyte. Au moment de sa remise sous tension, son courant de fuite est important. La couche d'alumine se reforme rapidement et le courant de fuite reprend sa valeur normale.

Sa valeur dépend de la tension de service et de la température.

A 20° C, il doit être inférieur à : $1{,}5.10^{-4}$ UC + 0,1 entre 6 et 50 V ; $1{,}5.10^{-4}$ UC + 0,2 entre 51 et 150 V ; 10^{-4} UC + 0,3 au-dessus de 150 V.

U est la tension nominale en volts ; C, la capacité nominale en μF.

LIMITE DE LA COMPOSANTE ALTERNATIVE.

Un condensateur électrolytique sert au filtrage ou au découplage. On applique à ses bornes une tension continue et une tension alternative superposée (50 Hz, 100 Hz ou B.F.). Le pourcentage de la tension alternative par rapport à la tension continue ne doit pas dépasser : 15 % pour les tensions de service inférieures à 50 V, et 10 % pour les tensions de service supérieures à 50 V.

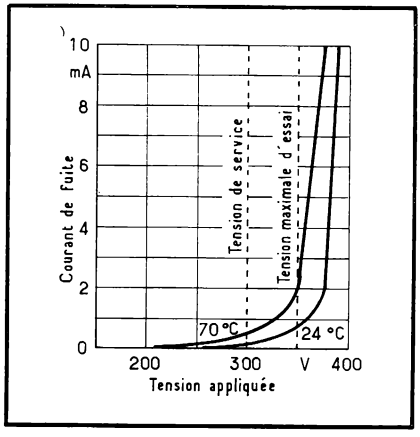


Fig. 4 - 46. — Variation du courant de fuite à 24° C et à 70° C en fonction de la tension appliquée (T.C.C.).

De plus, la somme de la tension continue et de la tension alternative de crête ne doit pas dépasser la tension de service nominale du condensateur.

TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

Entre 6 et 12 V : — 10, + 150 %.

Entre 25 et 50 V : — 10, + 100 %.

Au-dessus de 50 V : — 10, + 50 %.

La variation de capacité entre — 10° et + 55° C ou + 70° C ne doit pas dépasser ± 35 %.

NORMES.

F.N.I.E. 023 — Condensateurs électrolytiques à électrodes en aluminium.

F.N.I.E. 024 et 025 — Condensateurs miniatures pour tensions inférieures à 63 V.

C.E.I. 103 — Condensateurs électrolytiques à l'aluminium.

U.T.E. C 93-110 — Condensateurs électrolytiques à l'aluminium.

U.T.E. C 93-115 — Condensateurs miniatures pour tensions inférieures à 63 V.

C.C.T. 02-10 — Condensateurs électrolytiques à l'aluminium.

TENSIONS NORMALISÉES.

U.T.E. C 93-110 : T_s : 6, 12, 25, 50, 150, 200, 275, 350, 450 V.

U.T.E. C 93-115 : T_s : 2,5, 4, 6,3, 10, 12, 16, 25, 40, 63 V.

CAPACITÉS NOMINALES.

U.T.E. C 93-110 : 8, 16, 25, 32, 50, 100, 250, 500, 1 000 µF.

U.T.E. C 93-115 : 1, 1,25, 1,6, 2, 2,5, 3,2, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1 000, 1 200, 1 600, 2 000, 2 500, 3 200, 5 000 µF.

8.4. — Les différents modèles.

8.4.1. — *CONDENSATEURS NORMAUX, SOUS BOITIER ALUMINIUM.*

Il existe une grande variété de modèles de ce type qui peuvent :

— soit se fixer au châssis par un écrou se vissant sur une pièce filetée isolante,

— soit se fixer au châssis par des pattes de différentes formes,

— soit posséder des sorties à fil, la fixation s'effectuant au moyen d'un collier.

Le tube d'aluminium peut être nu ou protégé par un film de plastique.

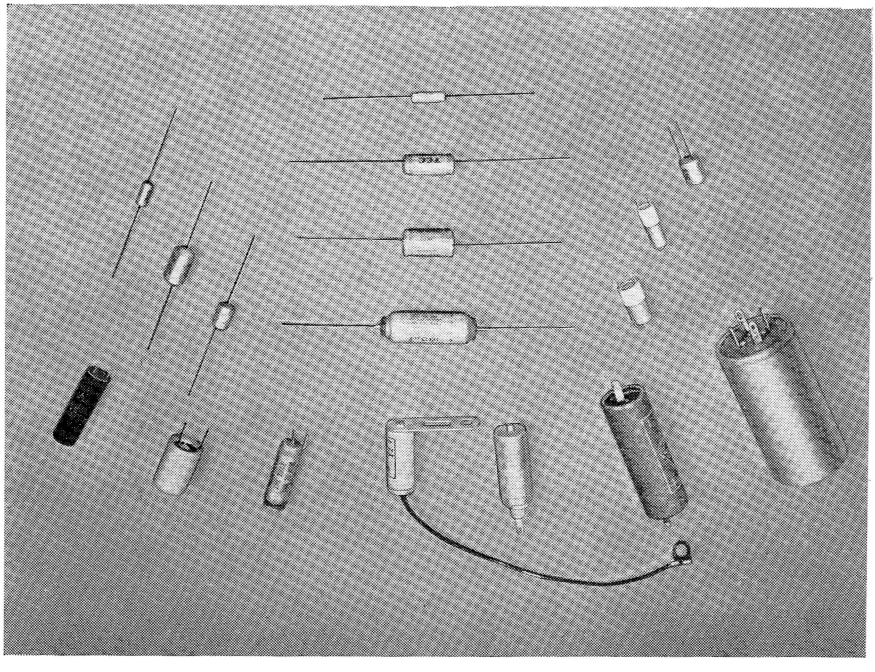


Fig. 4 - 47. — Différents modèles de condensateurs électrolytiques.

Ces modèles peuvent être de la classe grand public ou de la catégorie professionnelle, à anode lisse ou à anode gravée. Ils contiennent parfois plusieurs capacités dans le même tube.

Ils existent pour toutes les valeurs et toutes les tensions normalisées.

8.4.2. — *CONDENSATEURS MINIATURES SOUS BOITIER ALUMINIUM.*

Ils sont spécialement prévus pour les circuits transistorisés et suivent les normes pour les condensateurs de tension de service inférieure ou égale à 63 V. Ils sont très petits.

Ils ont des sorties axiales ou radiales pour insertion dans les circuits imprimés.

8.4.3. — *CONDENSATEURS POUR COURANT ALTERNATIF.*

Ils sont obtenus en bobinant ensemble deux anodes formées au lieu d'une anode et d'une cathode. Le schéma électrique réalisé est celui de deux condensateurs polarisés opposés et montés en série (fig. 4 - 48). Les séparateurs sont doublés, quatre épaisseurs de papier entre chaque électrode. Toutes choses égales, la valeur de la capacité obtenue est la moitié de celle d'un condensateur normal.

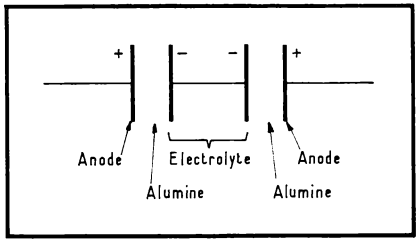


Fig. 4 - 48. — Condensateur électrolytique pour courant alternatif.

Ils sont utilisés pour le démarrage des moteurs asynchrones monophasés, par exemple : capacité : entre 20 et 200 µF ; tension de service : 127 et 220 V.

Ils permettent trente démarrages de 10 secondes à l'heure avec une température ambiante de 20° C.

8.4.4. — *CONDENSATEURS PROFESSIONNELS.*

Ils sont placés dans une double enveloppe thermodurcissable cylindrique et hermétique. Ils sont ainsi mieux protégés contre les accélérations, les vibrations et les chocs. Ils existent en version polarisée ou non, pour les hautes tensions et pour les basses tensions. Ils fonctionnent dans la plage — 40° à +85° C.

9. — LES CONDENSATEURS ELECTROLYTIQUES AU TANTALE.

Leur principe est le même que celui des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. Le diélectrique est formé par un film d'oxyde de tantale très robuste. On obtient ainsi des condensateurs plus petits et d'une très grande fiabilité.

9.1. — Le tantale.

C'est un métal réfractaire traité par métallurgie des poudres. La poudre de tantale est pressée en barreaux soumis à un premier frittage sous vide. Puis, ils sont forgés à froid pour être moins poreux. A nouveau, ils sont frittés sous vide vers 2 900° C pour atteindre une densité d'environ 16,5. Les lingots peuvent être laminés ou étirés à froid jusqu'à obtenir des feuilles de 12 µ d'épaisseur et des fils de 0,1 mm de diamètre.

Le tantale est inerte vis-à-vis de nombreux réactifs, ce qui autorise l'emploi d'électrolytes intéressants, tels que l'acide sulfurique. Cependant, il absorbe 700 fois son volume d'hydrogène et tous les traitements doivent être effectués sous vide.

9.2. — La fabrication.

9.2.1. — *MODÈLE BOBINÉ.*

C'est la transposition au tantale du modèle à l'aluminium. Le tantale est laminé en bandes de 12 μ d'épaisseur. Une bande est formée par électrolyse sous tension variable. Elle est recouverte par une couche d'oxyde Ta_2O_5 dont l'épaisseur est d'environ 10^{-7} cm par volt. La tension de scintillation est ici de 300 V, ce qui limite la tension de service à 150 V.

La bande de tantale n'a pas besoin d'être gravée, car elle est naturellement poreuse. Sa surface utile est le double de sa surface réelle. La bande étant beaucoup plus mince : 12 μ contre 120 μ, et la constante diélectrique de l'oxyde de tantale étant de 11 au lieu de 9 pour l'alumine, on obtient des condensateurs de volume moindre à capacité et à tension de service égales.

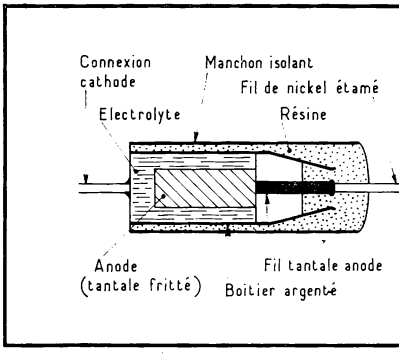


Fig. 4 - 49. — Condensateur au tantale à anode massive frittée.

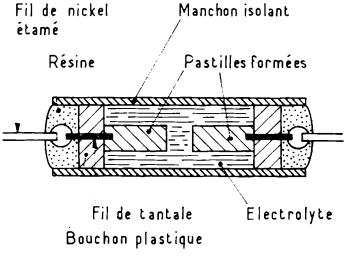


Fig. 4 - 50. — Condensateur à anode massive non polarisée.

Le bobinage est placé dans un boîtier en argent ou en cuivre argenté. L'imprégnation s'effectue sous vide avec un électrolyte à résistance élevée à base de glycol, d'acide borique, de sulfate de sodium ou de chlorure de lithium.

Les fils de sortie sont en tantale, prolongés par des fils de nickel étamé soudés électriquement.

On peut fabriquer des condensateurs non polarisés en bobinant ensemble deux bandes formées.

9.2.2. — *MODÈLE A ANODE MASSIVE FRITTÉE.*

L'anode est constituée par une pastille de poudre de tantale pressée et frittée (fig. 4 - 49). La pastille étant poreuse, on obtient une surface active de 1 m^2 par cm^3 de volume.

On forme l'anode au moyen d'un électrolyte très fluide et de faible résistance. C'est l'acide sulfurique à 40° B qui convient le mieux. Dans ces conditions, la tension de scintillation est de 150 V, ce qui limite la tension de service à 75 V ; c'est donc un modèle basse tension.

La cathode est formée par un boîtier en argent qui assure un bon contact avec l'électrolyte et n'est pas attaqué par lui. La sortie cathodique est réalisée par un fil de cuivre étamé soudé au boîtier.

La sortie anodique est constituée par un fil de tantale pressé contre la pastille. Il est soudé électriquement à un fil de nickel étamé qui sort du condensateur.

Le boîtier en argent est obturé par une résine thermo-durcissable. Il est parfois protégé par un manchon métallique ou isolant selon le cas.

On fabrique, selon le même principe, des condensateurs non polarisés (fig. 4 - 50). On place dans un manchon isolant deux pastilles de tantale formées aboutissant aux deux sorties qui sont en nickel étamé.

9.2.3. — *MODÈLE A ÉLECTROLYTE SOLIDE.*

C'est un condensateur à anode massive frittée dans lequel l'électrolyte liquide est remplacé par du bioxyde de manganèse solide (fig. 4 - 51). Un tel condensateur est plus robuste, il peut être stocké pendant une longue période sans altération.

L'anode est obtenue et formée comme précédemment. Puis, elle est recouverte par une couche de bioxyde de manganèse obtenue par pyrolyse d'une solution aqueuse de nitrate de manganèse qui pénètre dans tous les pores de l'anode. Elle est ensuite enduite de carbone colloïdal et argentée par réduction chimique.

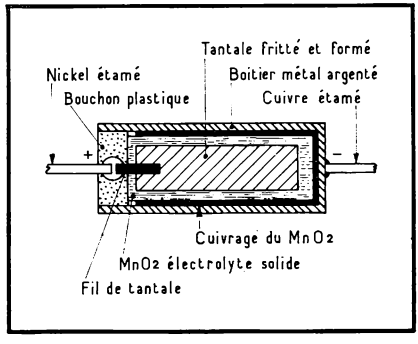


Fig. 4 - 51. — Condensateur au tantale à électrolyte solide.

La connexion d'anode est obtenue comme précédemment. L'ensemble est introduit dans un boîtier en métal argenté. Il est indispensable que le contact de cathode soit parfait.

Le boîtier est fermé par un bouchon de résine synthétique.

Avant le stockage, on effectue un vieillissement, comme du reste pour tous les condensateurs électrolytiques.

Ne contenant aucun liquide, aucune congélation de l'électrolyte aux basses températures n'est à craindre.

9.3. — Les caractéristiques.

ANGLE DE PERTES.

La tangente de l'angle de pertes est assez élevée, comme pour tous les condensateurs électrolytiques. A 25° C, elle est inférieure ou égale à 600.10^{-4}. Elle augmente pour les températures extrêmes. A — 55° C et à + 85° C, elle doit être inférieure à 900.10^{-4}.

ISOLEMENT (COURANT DE FUITE).

Le courant de fuite est généralement plus faible que pour les condensateurs électrolytiques. Il est compris entre 1 et 5 μA selon la valeur de la capacité et de la tension de service.

LIMITE DE LA COMPOSANTE ALTERNATIVE.

La valeur de crête de la composante alternative peut être au maximum égale à la tension de service. Cette caractéristique est favorable pour les liaisons dans les circuits transistorisés.

TOLÉRANCES SUR LA CAPACITÉ.

— Condensateurs électrolytiques : ± 20 % ou — 15 + 50 %.
— Modèles à électrolyte sec : ± 20 %, ± 10 %.

NORMES.

C.C.T. 02 - 06 — Condensateurs au tantale.
C.C.T. 02 - 12 — Condensateurs au tantale à électrolyte solide.

CATÉGORIES.

Condensateurs au tantale :
45 : — 55° + 85° C.
43 : — 55° + 125° C.
42 : — 55° + 155° C (utilisables jusqu'à + 175° C avec réduction de tension).

Condensateurs à électrolyte solide :
45 : — 55° + 85° C.
43 : — 55° + 125° C.

TENSIONS NORMALISÉES.

Condensateurs au tantale : T_s : 6,3 — 10 — 16 — 25 — 40 — 75 V.
Condensateurs à électrolyte solide : T_s : 6 — 10 — 16 — 25 — 35 V.

CAPACITÉS NOMINALES.

Série E 12 ; la série E 6 est préférentielle.

9.4. — Les différents modèles.

9.4.1. — *CONDENSATEURS BOBINÉS.*

Ce sont des modèles tubulaires en boîtier métal argenté, fermés par des rondelles de néoprène.

Capacité : 0,5 à 100 μF (selon la tension de service).
Tension de service : entre 6 et 150 V.
Plage de température : — 55° à + 85° C ou + 125° C.
Tolérances sur la capacité : — 30 + 50 % ou ± 20 %.

Il existe également des modèles en boîtiers qui contiennent quatre à six condensateurs dans une cuve en cuivre argenté. Les caractéristiques générales sont les mêmes. On peut atteindre 1 000 μF.

9.4.2. — *CONDENSATEURS A ANODE MASSIVE.*

Ils sont également tubulaires en boîtier argent, ou boîtier plastique fermés par de la résine synthétique (fig. 4 - 52).

Capacité : 4,7 à 470 μF (selon la tension de service).
Tension de service : entre 6,3 et 75 V.
Plage de température : — 55° à + 85° C ou + 125° C.

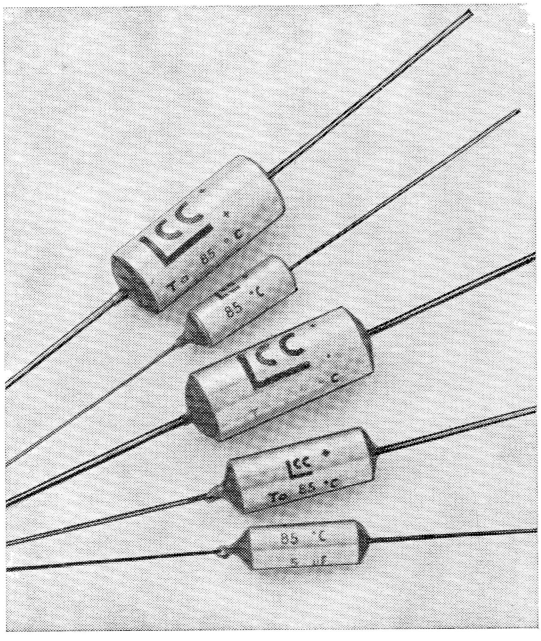


Fig. 4 - 52. — Condensateurs au tantale à anode massive (L.C.C.).

Les modèles non polarisés ont les mêmes caractéristiques. A volume et à tension de service égaux, les capacités sont réduites de moitié.

9.4.3. — *CONDENSATEURS A ÉLECTROLYTE SOLIDE.*

Ce sont des condensateurs tubulaires en boîtier métallique isolé ou non, obturés par de la résine synthétique.

Capacité : de 0,47 à 330 µF (selon la tension de service).

Tension de service : entre 6 et 35 V.

Tolérances sur la capacité : ± 20 %, ± 10 %.

LES CONDENSATEURS VARIABLES

1. — LES CONDENSATEURS VARIABLES A AIR.

1.1. — Généralités.

Ce sont des condensateurs destinés à accorder les circuits oscillants des appareils sur une fréquence déterminée. Ils sont répartis en deux grandes catégories : les condensateurs grand public et les condensateurs professionnels.

Les condensateurs grand public servent à accorder les récepteurs sur la fréquence de la station à recevoir dans les bandes réservées à la radiodiffusion. C'est le même modèle qui permet la réception des gammes G.O. — P.O. — O.C., c'est-à-dire pratiquement entre 150 kHz et 23 MHz (2 000 m et 13 m). En revanche, il faut un modèle spécial pour capter les stations modulées en fréquence de la bande II entre 87,5 et 100 ou 108 MHz (bande des 3 m). L'axe de ces condensateurs est réuni à une démultiplication plus ou moins efficace selon le volume et le prix des récepteurs. Celle-ci est commandée par le bouton de recherche des stations à la disposition de l'usager. Une aiguille se déplaçant devant un cadran permet un repérage plus ou moins précis.

Ces condensateurs doivent être réalisés avec une très grande précision, et leur fabrication doit être la plus économique possible. Ce compromis est difficile à satisfaire.

Les condensateurs professionnels sont étudiés en vue d'une application précise. Il ne s'agit pas de grandes séries, mais de fabrication sur cahier des charges. Il en existe une très grande variété de modèles. Il en est de très petits

pour accorder les circuits transistorisés et miniaturisés. Il en est de très grands pour les étages à grande puissance des émetteurs. Leur fabrication est très soignée et prévue pour tenir les conditions mécaniques, électriques et climatiques imposées.

Les condensateurs ajustables, qui ne servent qu'au réglage des appareils en cours de fabrication et qui ne sont pas retouchés en service courant, doivent être étudiés séparément, car leur conception est très différente de celle des condensateurs variables.

1.2. — Les condensateurs variables grand public.

1.2.1. — *FABRICATION.*

La figure 5 - 1 donne en exemple un condensateur *Aréna* à deux cages égales, démultiplication par engrenage, axe de commande indirect et avec un condensateur ajustable sur chacune des cages.

Un tel condensateur comprend :

— un bâti très rigide,
— des lames fixes isolées,
— des lames mobiles réunies à la masse du bâti,
— et un axe de commande.

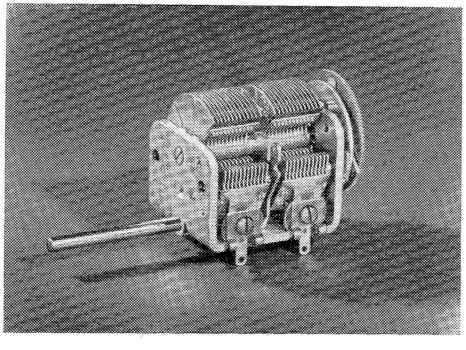


Fig. 5 - 1. — Condensateur variable grand public Arena, à deux cages égales, démultiplication par engrenage et axe de commande indirect (série 2 000 D). On remarque la présence du condensateur ajustable sur chacune des cages.

Le bâti est en acier cadmié ou zingué passivé afin d'éviter toute oxydation. Son usinage est très précis, car il positionne les différents éléments entre eux.

Les lames sont en aluminium. Les feuilles sont vieillies par un traitement thermique afin de stabiliser leurs caractéristiques mécaniques. Puis, les lames sont découpées et planées au micron. Cette opération est indispensable pour obtenir la précision nécessaire de la loi de variation de capacité.

L'axe de commande est en acier nickelé ayant reçu un polissage poussé de sa surface. Il est maintenu en position dans le bâti au moyen d'une bille sur laquelle il repose à une extrémité, et par un roulement à billes inséré dans le flasque opposé. Les billes sont en acier nickelé poli.

Les condensateurs spéciaux pour la gamme F.M. ont généralement des lames en laiton argenté épaisses et rigides.

Les lames mobiles sont serties sur l'axe de commande et sont maintenues à une extrémité par une pièce assurant un écartement régulier et stable.

Par suite du graissage indispensable des billes, les lames mobiles risquent de n'être pas parfaitement à la masse. Une résistance de contact appréciable n'est pas admissible en H.F. Aussi, un ressort en chrysocale fixé au bâti et appuyant sur l'axe réduit la résistance série.

Les lames fixes sont positionnées par deux pièces en acier ou en laiton serties ou soudées selon les fabrications. Puis, elles sont isolées du bâti au moyen de deux barrettes de bakélite ou de céramique selon les conditions climatiques exigées. Ces barrettes reçoivent les cosses de sortie et éventuellement les condensateurs ajustables.

Le montage des lames fixes et des lames mobiles doit être extrêmement précis afin que les interlames soient réguliers. La valeur de la capacité est surtout déterminée par cette rigueur de montage. On l'obtient au moyen de calibres dont la précision est de l'ordre du micron.

La fabrication des condensateurs grand public doit être étudiée avec soin car il faut faire des grandes séries en mécanique de précision tout en obtenant un prix compétitif forcément très tiré.

Dans les modèles normaux l'axe principal sort directement et est destiné à être monté sur un démultiplicateur. Par contre, les modèles de dimensions réduites pour récepteurs à transistors ont une démultiplication incorporée.

Elle peut être située dans l'axe (démultiplication par billes) ou nécessiter un renvoi de l'axe sur l'autre face du condensateur (démultiplication par engrenages, fig. 5 - 1).

Si les lames ne sont pas suffisamment rigides ou si elles sont mal serties, il faut craindre *l'effet Larsen.* C'est une réaction électromécanique entre le haut-parleur et les lames du condensateur d'oscillateur. En effet, le haut-parleur est placé dans le coffret du récepteur. A forte puissance tout l'appareil vibre en fonction de la modulation B.F. Si cette vibration fait se déplacer les lames on constate une variation de capacité modulée en B.F. C'est donc une réaction positive de même nature que celle observée en sonorisation lorsque le microphone est placé trop près des haut-parleurs occasionnant un accrochage. Ici, la capacité variable accordant l'oscillateur local module en B.F. la fréquence intermédiaire. Elle se comporte comme un microphone à condensateur.

La variation de capacité sous l'effet des vibrations n'est pas très importante si les lames sont bien centrées. Elle l'est beaucoup plus si les interlames sont irréguliers. C'est une raison de plus pour que le montage des lames soit parfait. Pour éviter le Larsen il faut que le condensateur soit bien étudié et bien fabriqué. En particulier les lames doivent être suffisamment épaisses, faute de quoi on ne peut avoir la rigidité nécessaire. De plus, on monte généralement le condensateur d'une façon assez souple pour amortir les vibrations électro-acoustiques. Ce défaut se manifeste surtout lors de la réception des gammes d'ondes courtes.

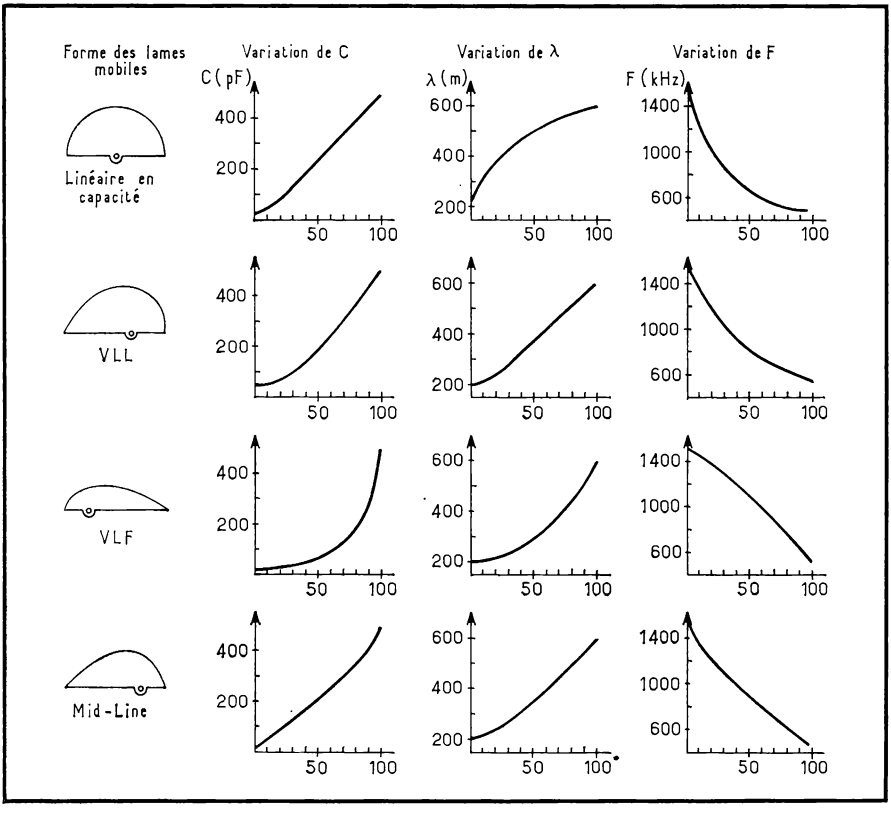


Fig. 5 - 2. — Différentes lois de variation possibles des condensateurs variables : linéaire en capacité, linéaire en longueur d'onde, (V.L.L.), linéaire en fréquence (V.L.F.) et midline.

1.2.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les condensateurs variables à air grand public doivent satisfaire à la spécification F.N.I.E. 015 A (1963).

Un des paramètres les plus importants à définir est la loi de variation de capacité. L'établissement des bobinages et de la gravure des cadrans en dépend.

La loi de variation de capacité détermine la forme des lames et la fabrication du condensateur. Si on découpe des lames circulaires, la variation de surface en regard pour un certain angle de rotation de l'axe est la même quelle que soit la position de cet angle au début, au milieu ou à la fin de la course. On dit que la variation de capacité est linéaire.

On sait que la fréquence propre d'un circuit oscillant est donnée par la formule de Thomson :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\,C}}$$

f en hertz, L en henrys, C en farads.

D'autre part :

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

λ est la longueur d'onde en mètres,

V est la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques ; c'est une constante égale à 3.10^8 m/s,

f est la fréquence du circuit oscillant en hertz.

D'après ces formules, on voit qu'une variation linéaire de la capacité donne une variation logarithmique en longueur d'onde et en fréquence. L'inscription des stations sur le cadran n'est pas régulière.

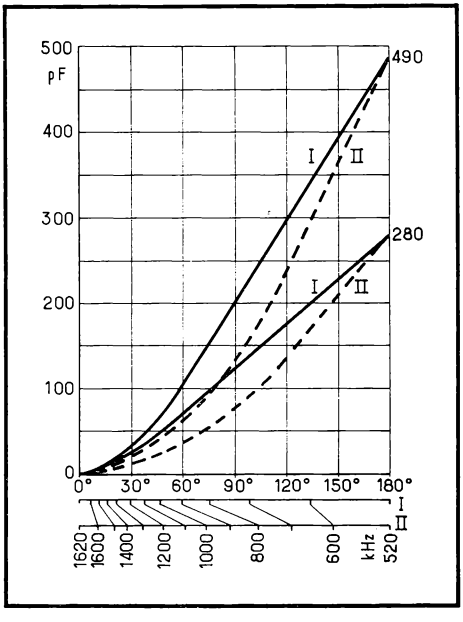


Fig. 5 - 3. — Courbes de variations linéaires en capacité (I) et midline (II) pour des condensateurs de 490 pF et de 280 pF. A la partie inférieure de la figure, on note la répartition des fréquences d'accord en utilisant des bobinages normalisés.

Puisque les stations sont espacées régulièrement en fréquence (tous les 9 kHz), il serait logique de prévoir une variation linéaire en fréquence. A ce moment la variation de capacité est logarithmique. Cette solution n'a pas pu être retenue car il devient impossible de fabriquer des condensateurs de petites dimensions et les lames sont difficiles à fixer ; leur rigidité restant précaire.

Il a été normalisé deux courbes de variation de capacité : la courbe linéaire et la courbe appelée « midline ». C'est une courbe intermédiaire entre la courbe

de variation logarithmique de capacité et la courbe linéaire de fréquence. On obtient avec cette courbe un même *pourcentage* de variation de fréquence en fonction de la rotation du rotor.

La courbe linéaire en longueur d'onde n'est pas intéressante et n'a pas été retenue.

La figure 5 - 2 dresse le tableau schématique de toutes les solutions possibles avec les courbes en capacité, en longueur d'onde et en fréquence obtenues.

La spécification F.N.I.E. donne quatre points pour définir la courbe standard de variation linéaire de capacité.

Angle de rotation	54°	90°	144°	180°
Pourcentage de capacité.	30 %	50 %	80 %	100 %

Les courbes de la figure 5 - 3 prises en exemple donnent les variations linéaires de capacité (I) et midline (II) pour des condensateurs de 490 pF et de 280 pF de valeur maximale. Associés à des bobinages normalisés, la cage 490 pF en accord et la cage 280 pF en oscillateur, ces condensateurs permettent un étalonnage du cadran indiqué à la partie inférieure de la figure, respectivement en I et en II. On voit que la variation linéaire en capacité (I) oblige à serrer les inscriptions des stations sur le cadran entre 1 000 et 1 600 kHz. La courbe midline (II) permet une répartition plus régulière.

La *capacité résiduelle* est celle qui reste lorsque les lames mobiles sont complètement sorties et en butée. Elle est fonction de la valeur de la capacité maximale. Elle est comprise entre 5 et 15 pF selon les modèles.

L'élément de référence de la spécification doit être utilisé en oscillateur local. L'autre élément correspond à l'accord.

La fréquence de résonance des condensateurs est donnée par la valeur de l'inductance propre de l'appareil associée avec la capacité en service. Elle doit être supérieure à la fréquence la plus élevée à recevoir.

Le coefficient de température est légèrement positif ; il doit être inférieur à $200.10^{-6}/°$ C.

Le couple de rotation ne doit pas être trop élevé, ni trop faible. Il doit être au plus de 3,5 cmN et au moins de 0,5 cmN, afin de permettre un réglage précis et aisé.

Le rapport de démultiplication par engrenages peut être soit de 1/4 soit de 1/6,33, par billes il est d'environ 1/5.

Les axes selon les modèles ont un diamètre soit de 6 mm, soit de 4 mm.

Le tableau ci-après, extrait de la spécification F.N.I.E., donne les principaux types normalisés avec leurs caractéristiques.

Le condensateur de 14,5 pF de capacité maximale est destiné à la réception de la gamme F.M.

Le condensateur 94-185 pF est destiné aux récepteurs miniatures. Ce type de condensateur est souvent prévu avec un diélectrique solide (film plastique) qui permet de rapprocher les lames et de diminuer leur surface pour une même capacité maximale.

Capacité nominale		Capacité résiduelle maximale (1)		Capacité utile minimale des condensateurs ajustables	Loi de Variation (2)	Tolérance		Fréquence maximale de résonance en MHz
Elément de référence	Autre élément	Elément de référence	Autre élément			Conformité	Alignement (6)	
490 (3)	490 (3)	15	15	20	Midline	± (1 %+1 pF)	± 1 % ou 1 pF	30
380 (3)	380 (3)	15	15	20	Midline	± (1 %+1 pF)	± 1 % ou 1 pF	30
200 (4)	380	13	15	20	Midline	± (1 %+1 pF)	± 1 % ou 1 pF	30
280 (4)	280	11	12	10	Linéaire ou Midline	± (2 %+1 pF)	± (1 %+1 pF)	40
120 (4)	280	7	9	10	Linéaire ou Midline	± (2 %+1 pF)	± (1 %+1 pF)	40
95 (4) (5)	185 (5)	5	6	10	Linéaire ou Midline	± (2 %+1 pF)	± (1 %+1 pF)	40
14,5 (7)	14,5 (7)	5	5	—	Linéaire	± 0,5 pF	± 0,5 pF	250

(1) Y compris la résiduelle du condensateur ajustable. La fiche technique du fabricant précisera la valeur moyenne de la capacité résiduelle particulière à chaque fabrication de série avec une tolérance de ± 1 pF ainsi que les capacités résiduelles utiles.

(2) A l'étude. Début de la loi fixée à 9° ; fin de la loi fixée à 175° 30'.

(3) Il est recommandé de choisir la valeur 380/380.

(4) Afin que ces condensateurs puissent être utilisés avec les deux fréquences intermédiaires 455 kHz et 480 kHz, la loi de variation de l'élément de référence a été déterminée en prenant comme fréquence intermédiaire la valeur *fictive* de 467,5 kHz $\frac{(455 + 480).}{2}$

(5) Pour la variante à diélectrique solide de ce condensateur variable, une spécification est en cours d'études.

(6) La plus forte des deux valeurs.

(7) Applicable depuis Juin 1963. Ce condensateur est destiné à la MF. Pour les condensateurs mixtes MA/MF, ces capacités nominales peuvent être associées aux capacités nominales 380/380 et 120/280.

1.3. — Les condensateurs variables professionnels.

1.3.1. — *FABRICATION.*

Elle est fondée sur le même principe général que celui utilisé pour les condensateurs grand public. Cependant elle est beaucoup plus élaborée, beaucoup plus précise et beaucoup plus robuste.

La cage est en acier cadmié tropical. L'axe est en acier inoxydable ainsi que les paliers et les billes.

Les lames sont en laiton argenté et parfois doré. Elles sont soudées à l'axe et à la pièce de positionnement.

Les languettes de contact de masse ont des grains d'argent massifs afin d'assurer une mise à la masse parfaite et constante des lames mobiles.

Les lames fixes sont isolées par des pièces en céramique siliconée.

Il est très rare de prévoir des condensateurs ajustables ou des démultiplicateurs sur ces composants.

1.3.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Il existe deux spécifications pour ces types de condensateurs :

1) *C.C.T. 03-05* (1959). — Condensateurs variables à air, à loi de variation définie.

La valeur nominale de capacité des différents modèles normalisés suit la progression E 12 entre 47 et 1 000 pF.

La loi de variation peut être :

— linéaire de capacité,

— midline, .

— ou linéaire de fréquence $\sqrt{2}$, $\sqrt{3}$ ou $\times 2$.

Les tensions maximales de service sont : 400, 630, 1 000, 1 600 ou 2 500 V.

Le coefficient de température doit être inférieur à $40.10^{-6}/°$ C.

Les axes peuvent être reliés ou isolés de la masse. Leur diamètre est de 6 ou de 10 mm.

2) *C.C.T. 03-06* (1960). — Condensateurs variables à air, à flasques isolants.

Ce sont des condensateurs dont la cage est en matériau isolant au lieu de l'acier habituel. Ils peuvent être simples, doubles ou différentiels.

Leur capacité nominale suit la progression E 6 entre 10 et 220 pF.

Les tensions maximales de service sont : 250, 400, 630, 1 000 et 1 600 V.

L'axe de commande a un diamètre de 6 mm.

Ces deux normalisations ne couvrent qu'une faible partie des types de condensateurs professionnels nécessaires à l'industrie électronique. Ces besoins vont des condensateurs miniatures aux pièces supportant des tensions et des puissances élevées.

2. — LES CONDENSATEURS AJUSTABLES.

2.1. — Généralités.

Il existe un très grand nombre de modèles de condensateurs ajustables. Les principaux sont les suivants :

2.2. — Les condensateurs ajustables cylindriques à air.

Ils font l'objet de la spécification C.C.T. 03-02 (1961). Ils se composent d'un stator A (fig. 5 - 4) et d'un rotor B en alliage léger moulé. Ces pièces sont pourvues de lames concentriques formant les armatures du condensateur. Par rotation les armatures du rotor s'insèrent plus ou moins en regard de celles du stator dans la direction axiale. A cette fin l'axe C et l'intérieur de la tête du rotor sont filetés de manière à garantir un contact à ressort avec l'axe. Celui-ci est isolé du stator au moyen d'un tube de céramique E.

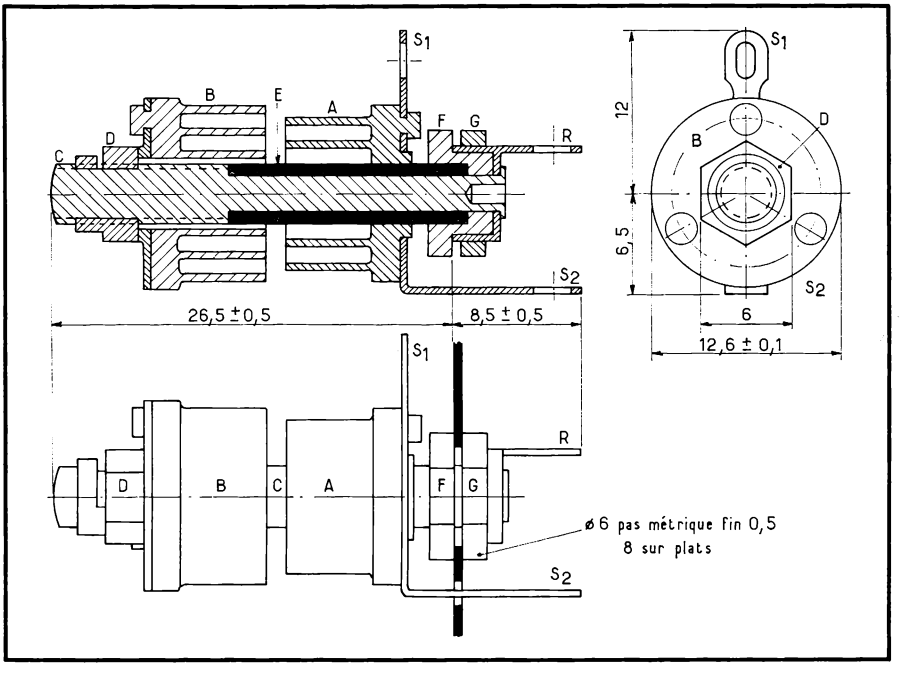


Fig. 5 - 4. — Condensateur ajustable cylindrique à air (Transco).

L'extrémité de l'axe comporte une cosse à souder R pour la connexion du rotor. Le stator comporte deux cosses à souder S_1 et S_2. Le système de fixation se compose d'une partie hexagonale filetée à l'extérieur et d'un écrou F.

Toutes les pièces métalliques autres que le stator et le rotor sont en laiton argenté.

La loi de variation d'un tel condensateur est linéaire. Ces modèles sont protégés en vue de satisfaire aux essais climatiques professionnels. Ils peuvent supporter entre 100 V et 630 V de tension de service maximale.

Leur capacité maximale est de quelques dizaines de pF, leur capacité résiduelle est comprise entre 3 et 5 pF.

La variation totale de capacité est obtenue entre 3 et 7 tours du rotor.

Il existe des modèles pour câblage conventionnel et pour câblage imprimé.

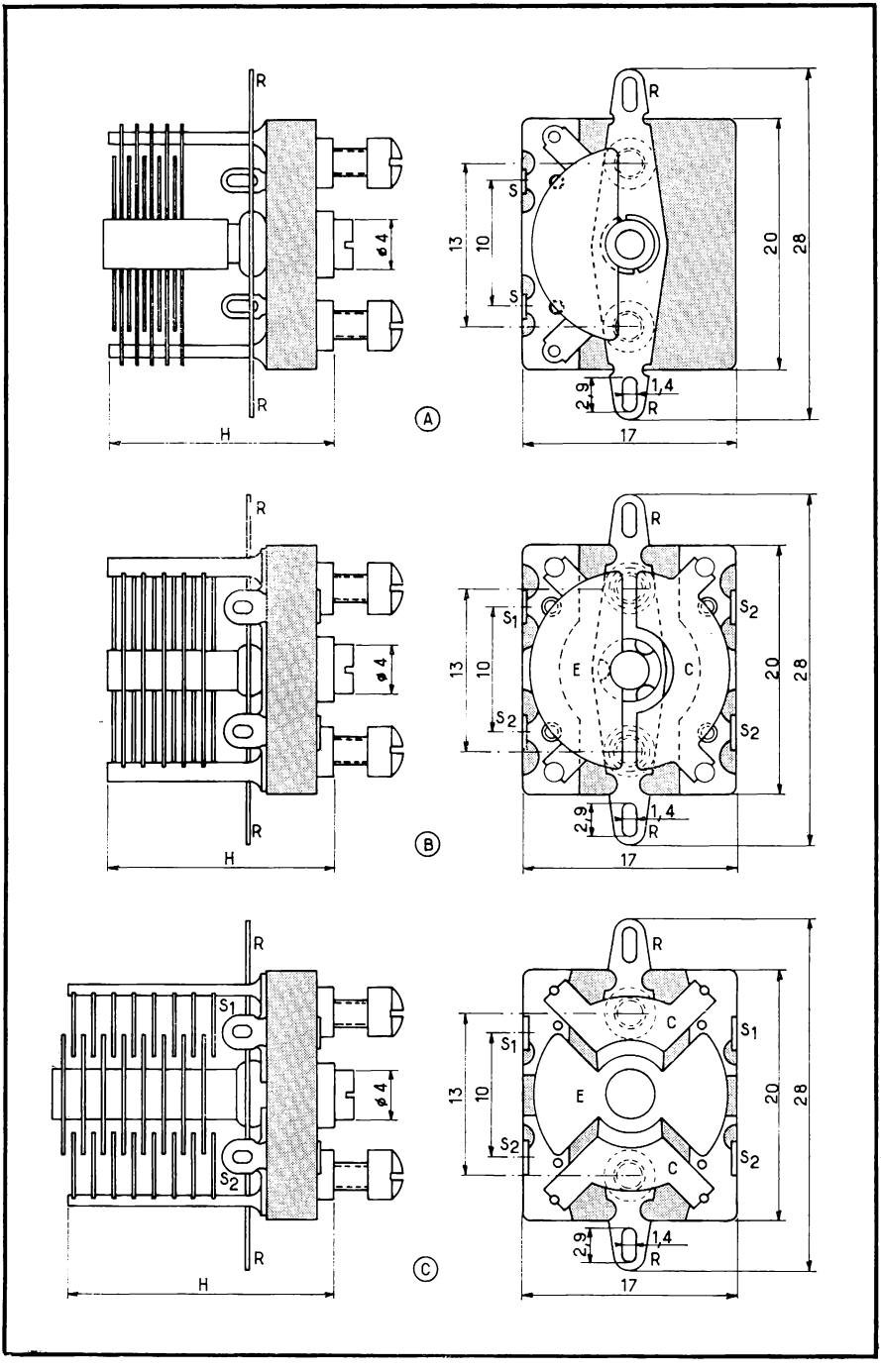


Fig. 5 - 5. — Condensateurs ajustables à air : modèle simple (A) ; modèle différentiel (B), modèle papillon (C), (modèles Transco).

2.3. — Les condensateurs ajustables à lames, à diélectrique air.

Spécification C.C.T. 03-01 (1960).

Pour un circuit oscillant simple un ajustable unique convient (fig. 5 - 5 *a*), mais pour les circuits symétriques il faut employer soit un ajustable différentiel (*b*), soit un ajustable « papillon » (*c*). En très haute fréquence ces ajustables tiennent lieu de condensateurs variables d'accord.

Ces trois types de condensateurs sont fabriqués à partir des mêmes éléments de base. Ils comprennent une plaquette de céramique siliconée sur laquelle sont sertis un ou deux stators, suivant le type, en laiton cadmié et deux écrous pour la fixation au châssis.

Le rotor également en laiton cadmié n'est pas isolé de l'axe sur lequel frotte un ressort dont la résistance de contact est très faible (inférieure à 3.10^{-3} Ω). Aucune butée ne limite le mouvement du rotor qui se commande par un tournevis. Stator et rotor sont isolés des écrous de fixation et par conséquent du châssis. On peut donc réaliser un couplage capacitif variable entre deux circuits sans liaison à la masse.

Tous ces modèles peuvent être livrés avec un système de blocage de l'axe.

Les valeurs de capacité cataloguées suivent la progression E 12, pratique-

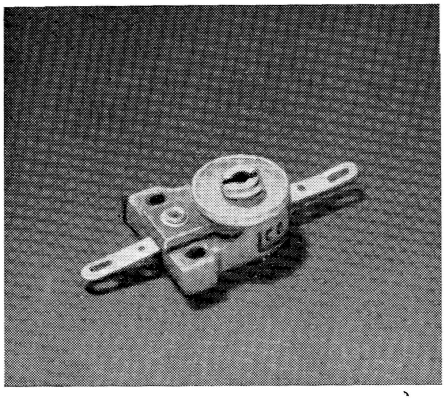


Fig. 5 - 6. — Condensateur ajustable à disque en céramique (L.C.C.).

ment entre 4,7 pF et 150 pF. Les tensions de service maximales sont échelonnées entre 160 V et 1 000 V.

La résistance d'isolement est supérieure à 10 000 MΩ. Les pertes sont inférieures à 25.10^{-4}. Le coefficient de température est inférieur à $+ 70.10^{-6}$/° C.

2.4. — Les condensateurs ajustables à disques en diélectrique céramique.

Spécification C.C.T. 03-03 (1960).

Un tel modèle comprend un socle en stéatite portant à sa partie supérieure une couche semi-circulaire d'argent fin (fig. 5 - 6). Un disque en céramique argenté sur la moitié de sa surface supérieure vient appuyer sur le socle. Le

disque de céramique forme donc le diélectrique entre les deux armatures d'argent. Celle du socle est fixe et celle du disque est réglable en le faisant tourner. Lorsque les deux surfaces argentées sont en regard la capacité est maximale. Cette valeur peut être très différente selon la constante diélectrique de la céramique utilisée pour le disque. De même le coefficient de température est soit positif, soit nul, soit négatif. Les modèles normalisés ont des disques en céramique de constante diélectrique croissante et dont le coefficient de tem-

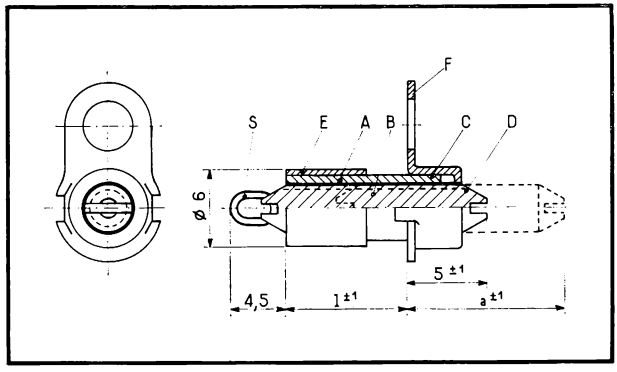


Fig. 5 - 7. — Condensateur ajustable cylindrique à la céramique (Transco).

pérature est compris entre + 100 et — 750.10^{-6}/° C. Il s'agit donc de céramiques stables du groupe I. Le coefficient de température négatif permet une correction de la dérive des circuits associés en fonction des variations de température.

La valeur des capacités cataloguées s'échelonne entre 7 et 100 pF, pour une tension de service pouvant atteindre 630 V.

2.5. — Les condensateurs ajustables cylindriques à diélectrique solide.

Spécification C.C.T. 03-04 (1960).

Selon les modèles le diélectrique peut être de la céramique, du verre ou un film plastique (P.T.F.E.).

2.5.1. — *CONDENSATEURS AJUSTABLES A LA CÉRAMIQUE.*

Il existe plusieurs modèles qui reposent sur le même principe (fig. 5 - 7). Le condensateur est composé d'un tube de céramique A rectifié intérieurement avec des tolérances très faibles afin d'éliminer tout jeu du rotor. Le tube est siliconé afin d'avoir des pertes très faibles même en atmosphère humide. Le rotor fileté B est en métal invar. Il peut être vissé dans le tube grâce à deux rainures radiales. La chemise en laiton E réunie à la cosse à souder S forme une armature ; elle est enfoncée à force sur le tube de céramique.

L'embase C en laiton argenté guide le rotor B au moyen d'une boucle ressort en bronze phosphoreux D, elle aboutit à la cosse de sortie F. Cet ensemble forme l'armature variable. Dans certains modèles l'armature extérieure est soudée directement dans un trou du châssis diminuant la résistance série de l'ensemble et permettant un fonctionnement aux fréquences très élevées : télévision par exemple.

Les valeurs de capacité maximale cataloguées sont comprises entre 3 et 20 pF. La capacité résiduelle étant de l'ordre de 1 pF. La loi de variation est linéaire. On n'utilise que la céramique à faible perte du groupe I dont le coefficient de température est compris entre + 150 et $-250.10^{-6}/°$ C. La tension de service est de 400 V. La variation totale de capacité est obtenue pour une rotation du rotor de 3 à 9 tours complets.

2.5.2. — *CONDENSATEURS AJUSTABLES A DIÉLECTRIQUE EN VERRE* (fig. 5 - 8).

Ces condensateurs sont basés sur le même principe que ceux en céramique qui viennent d'être décrits. Le tube de céramique est ici remplacé par un tube de verre métallisé à l'extérieur pour former une armature. Le rotor est main-

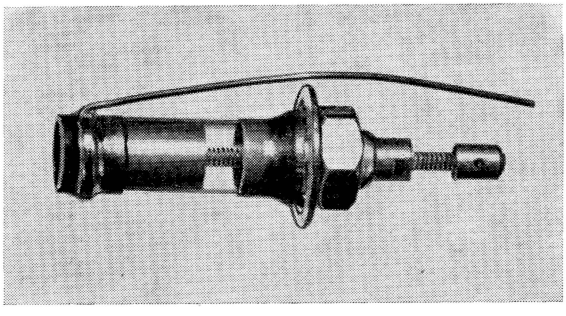


Fig. 5 - 8. — Condensateur ajustable cylindrique à diélectrique en verre (Corning-Sovirel).

tenu par un système métallique fixé à l'autre extrémité du tube de verre. Certains modèles *L.C.C.* ont un tube en quartz. Leurs caractéristiques principales sont du même ordre de grandeur.

2.5.3. — *CONDENSATEURS AJUSTABLES A DIÉLECTRIQUE PLASTIQUE* (polytétrafluoréthylène P.T.F.E.).

Ici, le tube est en plastique. La tension maximale atteint 630 V. La capacité maximale est de 6 pF pour une résiduelle de 1 pF. Le coefficient de température est légèrement positif : $+ 150.10^{-6}/°$ C. Pour tous ces modèles le coefficient de pertes est du même ordre, il ne dépasse pas 10.10^{-4}.

2.6. — Les condensateurs ajustables au mica.

Ils ne sont plus utilisés sur le matériel professionnel et de moins en moins sur le matériel grand public à cause de l'instabilité de leur réglage dans le temps.

Une électrode est fixée sur une embase en stéatite. La seconde électrode est élastique, elle est commandée par la vis de réglage. L'isolement est assuré par une feuille de mica. Le diélectrique est composite (air-mica), sauf pour la capacité maximale lorsque la vis est serrée à fond. La variation de capacité est très rapide près de la valeur maximale et très lente ensuite. Les vibrations et le vieillissement du ressort entraînent des variations de capacité appréciables.

LES BOBINAGES POUR LES CIRCUITS D'ALIMENTATION ET DE BASSE FRÉQUENCE

1. — GÉNÉRALITÉS.

1.1. — L'électromagnétisme.

Un électron au repos est entouré d'un *champ électrique*, tandis qu'un électron en mouvement produit en plus un *champ magnétique*. Donc tout conducteur parcouru par un courant électrique est entouré d'un champ électrique et d'un champ magnétique. On met en évidence ce phénomène en plaçant une aiguille aimantée au voisinage d'un conducteur. Dès que le courant circule, l'aiguille tend à se placer perpendiculairement au conducteur.

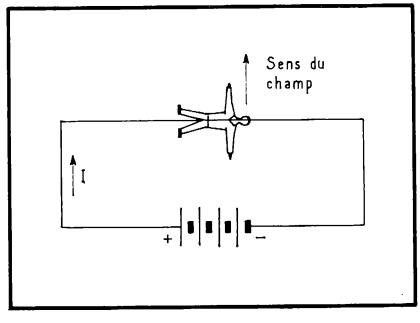


Fig. 6 - 1. — Règle d'Ampère.

La *règle d'Ampère* détermine le sens du champ magnétique autour d'un conducteur (fig. 6 - 1). On suppose un bonhomme couché sur le fil à plat ventre,

le courant lui entrant par les pieds, son bras gauche étendu donne le sens de déviation de l'aiguille aimantée, soit le sens de rotation des lignes de force autour du conducteur.

Pour augmenter l'intensité du champ magnétique on peut donner au fil la forme d'une spire et bobiner dans l'air ou sur un support un certain nombre de spires parallèles. On obtient une spirale cylindrique appelée *solénoïde* ou *bobine de self-induction.*

A l'intérieur d'un solénoïde parcouru par un courant I, le champ magnétique (H) est uniforme. Son intensité est proportionnelle à l'intensité du courant en ampère et au nombre de spires par mètre. Elle s'exprime en *ampère-tours par mètre.*

Dans un solénoïde, les lignes de force sont parallèles à l'axe de la bobine ; elles sortent par le pôle nord et se referment par le pôle sud. Pour trouver le sens des lignes de force du champ magnétique, il faut appliquer la règle du *tire-bouchon de Maxwell* (fig. 6 - 2). Si on fait tourner un tire-bouchon dans le sens du courant qui parcourt les spires, il se déplace dans le sens des lignes de force à l'intérieur du solénoïde. On en déduit que le pôle par où sortent les lignes de force est un pôle nord et que le pôle par où elles rentrent dans le solénoïde est un pôle sud.

Un solénoïde parcouru par un courant est comparable à un aimant droit.

Le *flux magnétique* à travers une section d'un solénoïde est de

$$\Phi = \frac{n\ I}{l}\ \mu\ s$$

Φ en weber,
I en ampère,
l en mètre,
μ perméabilité du support,
s section du solénoïde en m^2,
n nombre de spires.

En principe, on donne la valeur $\mu = 1$ à toutes les substances qui ne sont pas ferromagnétiques. C'est-à-dire à l'air et aux supports de bobinages tels que la bakélite, les matières plastiques, le verre, le quartz, la céramique, etc...

Le flux magnétique est fonction de la perméabilité du noyau, d'où l'importance des circuits magnétiques dans lesquels la perméabilité peut atteindre 2 500. Dans ce cas, il faut tenir compte des pertes par *hystérésis* dans le métal. Lorsqu'on mesure l'induction dans un circuit magnétique (B) en fonction du champ magnétique (H) on obtient la courbe caractéristique de l'hystérésis (fig. 6 - 3). Lorsque le champ croît, l'induction augmente d'abord d'une façon à peu près linéaire, puis plus doucement jusqu'à la saturation. Lorsque le champ décroît, la courbe d'induction diminue plus lentement. En inversant le champ on trace le cycle complet. L'induction est en retard sur le champ et le cycle d'hystérésis correspond à une perte dans le métal. On a intérêt à adopter des métaux ou des alliages ayant une surface de cycle d'hystérésis la plus réduite possible.

L'INDUCTION.

Un courant électrique est obligatoirement accompagné par un champ magnétique. De même, un champ magnétique *variable* induit un courant électrique

dans un conducteur ; c'est un *courant induit*. Le courant induit a un sens tel qu'il tend à s'opposer à la variation de flux qui l'a fait naître (Loi de Lenz).

Lorsqu'un circuit de résistance R subit une variation totale de flux $d\Phi$, la quantité d'électricité induite est de :

$$Q = -\frac{d\Phi}{R}$$

Q en coulomb, Φ en weber et R en ohm.

Le signe négatif traduit la loi de Lenz.

Le courant induit instantané est de :

$$I = \frac{d\Phi}{R\,dt}$$

I en ampère, $d\Phi$ variation de flux en weber, R en ohm, dt temps en seconde pendant lequel s'est produite la variation de flux $d\Phi$.

De même, la force électromotrice induite est :

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}$$

E en volt.

Toute variation de flux dans un circuit détermine une force électromotrice d'induction qui ne s'établit pas instantanément. La bobine est le siège d'une

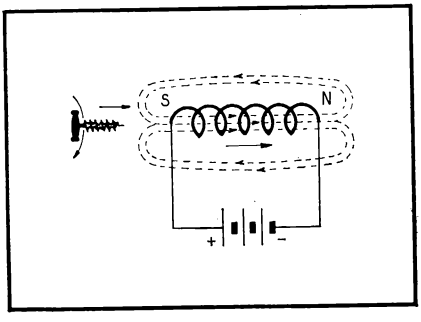


Fig. 6 - 2. — Règle du tire-bouchon de Maxwell. Les flèches indiquent respectivement le sens de rotation du tire-bouchon, son sens d'avancement ainsi que le sens des lignes de force et du courant.

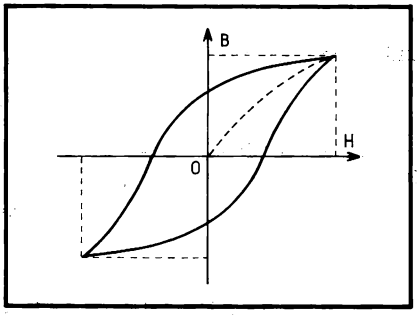


Fig. 6 - 3. — Cycle d'hystérésis.

auto-induction ou self-induction en anglais. C'est une induction que la bobine a créée elle-même. Le mot « self » employé seul n'a donc aucun sens, et c'est pourquoi l'on doit dire : bobine ou bobine de self-induction, ou à la rigueur inductance.

LE COEFFICIENT DE SELF-INDUCTION.

Le coefficient de self-induction est le rapport de la variation de flux à la variation de courant dans le circuit.

$$L = \frac{d\Phi}{dI}$$

L en henry, Φ en weber, I en ampère.

Si deux bobines sont placées l'une près de l'autre, une variation de champ magnétique de l'une entraîne une variation du flux qui traverse l'autre. La

grandeur relative de ce flux dépend des positions mutuelles des deux bobines, de leurs dimensions et de leur nombre de spires. Ce flux est grand si le couplage est important, il est faible ou nul si les deux bobines sont éloignées ou perpendiculaires. Le *coefficient d'induction mutuelle* entre deux circuits est de 1 henry lorsqu'un courant de 1 ampère dans l'un produit un flux de 1 weber dans l'autre, soit une force électromotrice de 1 volt.

Alors qu'un coefficient de self-induction est toujours positif par définition, un coefficient d'induction mutuelle peut être négatif si les bobines sont de sens inverse.

Les lois de l'induction montrent que tout conducteur qui coupe des lignes de force est le siège d'un courant induit. Ce courant est perpendiculaire au champ inducteur et se développe dans la masse du conducteur ou de toute masse métallique. Ces courants échauffent le métal et provoquent une perte dans le circuit ; ce sont les *courants de Foucault*. Ces courants suivent la loi de Lenz et tendent à s'opposer au champ inducteur variable. Ils sont d'autant plus intenses que les variations de flux sont rapides. C'est pourquoi les pertes par courant de Foucault sont importantes en H.F.

1.2. — La bobine de self-induction en alternatif.

Une spire conductrice tournant sur elle-même dans un champ magnétique uniforme est le siège d'une force électromotrice induite alternative

$$\left(E = -\frac{d\Phi}{dt}\right)$$

La tension instantanée est : $E_{max} \sin \omega t$. Si le circuit a une résistance R, l'intensité instantanée est :

$$I = \frac{E_{max} \sin \omega t}{R}$$

Les deux valeurs sont en phase et la puissance moyenne est :

$$P = E_{max} \sin \omega t \times I_{max} \sin \omega t$$

$$\text{ou } P = \frac{E^2_{max} \sin^2 \omega t}{R}$$

Pour étudier le comportement d'une bobine en alternatif il faut réaliser le schéma de la figure 6 - 4. Un alternateur de tension E et de fréquence *f* ali-

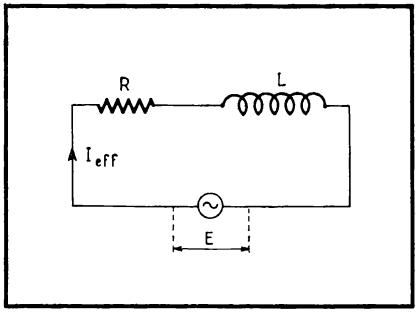


Fig. 6 - 4. — Résistance et self-induction en courant alternatif.

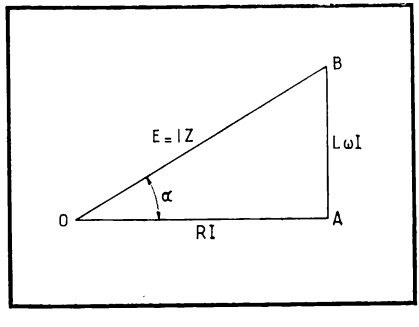


Fig. 6 - 5. — Diagramme vectoriel du circuit de la figure 6 - 4.

mente en série une résistance R et une bobine L. Il est en effet impossible de construire une bobine sans résistance. Une force contre-électromotrice de self-induction naît dans le circuit en vertu de la loi de Lenz. Cette tension tend à s'opposer à celle de l'alternateur. Donc, lorsque la tension de la source croît, l'intensité dans le circuit est plus faible que ne le veut la loi d'Ohm. C'est l'inverse qui se produit lorsque la tension de la source décroît. On dit que l'intensité est déphasée en arrière par rapport à la tension.

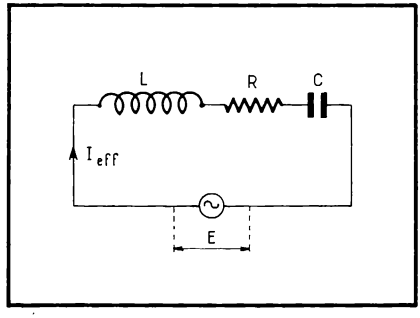


Fig. 6 - 6. — Circuit oscillant série.

On trace les vecteurs de la figure 6 - 5. La tension aux bornes de la résistance est égale à R I, elle est en phase avec la tension de la source (vecteur O A). La tension aux bornes de la bobine de self-induction est fonction de sa valeur L, de l'intensité I et de la fréquence du courant f. $\omega = 2 \pi f$, d'où : L ω I. Puisqu'elle tend à s'opposer à la tension de la source, elle est déphasée de 90° (vecteur A B). Il suffit de relier O B pour obtenir l'angle de déphasage α et la tension résultante aux bornes.

$$\text{tg } \alpha = \frac{L \omega I}{R I} = \frac{L \omega}{R}$$

Dans un triangle rectangle le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés :

$$E^2 = L^2 \omega^2 I^2 + R^2 I^2$$

$$E = I \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

C'est une généralisation de la loi d'Ohm en courant alternatif. On dit que :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

c'est *l'impédance* qui s'exprime en ohm. En alternatif la loi d'Ohm s'exprime :

$$E = I Z$$

L ω s'exprime aussi en ohm ; c'est la réactance de self-induction ou inductance.

La puissance moyenne dans le circuit est :

$$W = E_{eff} I_{eff} \cos \alpha$$

La puissance active est fournie par la source, c'est la *puissance wattée.* La puissance réactive est fournie par l'inductance à la source, c'est la *puissance dewattée.*

1.3. — Le circuit oscillant série.

On associe en série une bobine L, une résistance inévitable R et un condensateur C aux bornes d'un alternateur de tension E et de fréquence f (fig. 6 - 6).

La tension E est égale à la somme géométrique de la tension aux bornes de C et de celle aux bornes de L.

Pour résoudre ce problème par un graphique vectoriel, on trace d'abord le vecteur correspondant à la tension aux bornes de la résistance (vecteur O A = R I). Du point A, on élève la perpendiculaire A B proportionnelle à la force électromotrice de self-induction L ω I. Enfin, du point B, on trace le vecteur B C fonction de la force électromotrice de capacité I/C ω perpendiculaire à O A et déphasé de π/2 dans le sens du retard. C'est-à-dire que la f.é.m. de

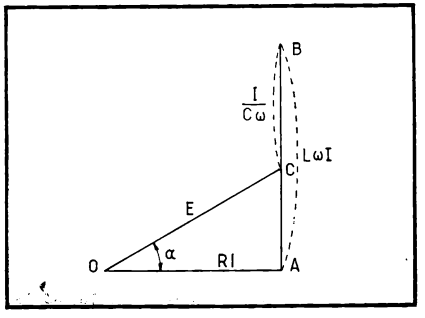


Fig. 6 - 7. — Résolution graphique du circuit série lorsque L ω I > I/C ω.

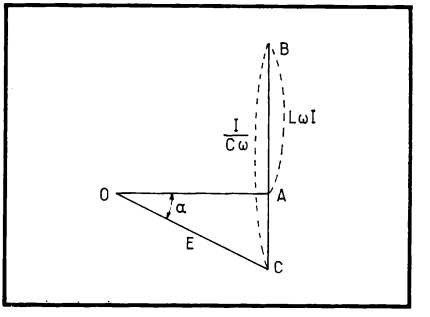


Fig. 6 - 8. — Résolution graphique du circuit série lorsque L ω I < I/C ω.

capacité se retranche de la f.é.m. de self-induction. La tension totale est donnée par le vecteur O C et l'angle de déphasage total est α.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L\,\omega\,I - \frac{I}{C\,\omega}}{R\,I} = \frac{L\,\omega - \frac{1}{C\,\omega}}{R}$$

$$E^2 = R^2\,I^2 + \left(L\,\omega\,I - \frac{I}{C\,\omega}\right)^2$$

$$E = \sqrt{R^2 + \left(L\,\omega - \frac{1}{C\,\omega}\right)^2}$$

La quantité sous le radical est l'impédance du circuit en ohm. Trois cas peuvent se présenter :

1° L ω I est plus grand que I/C ω (fig. 6 - 7). Le circuit total est *inductif*. L'intensité du courant qui le parcourt est déphasée en arrière de la tension.

2° L ω I est plus petit que I/C ω (fig. 6 - 8). Le circuit est *capacitif*. L'intensité du courant est déphasée en avant de la tension. L'angle de déphasage α est négatif.

3° L ω I est égal à I/C ω. On dit alors qu'il y a *résonance*. Le point C vient coïncider avec le point A. Il n'y a plus aucun déphasage. La tension E = R I. On dirait qu'il n'y a plus que la résistance R dans le circuit.

Les tensions L ω I et I/C ω aux bornes de L et de C peuvent être beaucoup plus grandes que la tension résultante E. On dit qu'il y a production de *surtension*. En particulier à la résonance, si R est très petit, la tension E = R I

est faible et les tensions $L\omega I = I/C\omega$ peuvent être très grandes. Le *coefficient de surtension,* ou l'*indice de qualité* Q, est $L\omega/R$. C'est le nombre de fois qu'il faut multiplier la tension de la source pour obtenir la tension aux bornes de l'inductance : $EL = EQ$. Il en est de même pour le condensateur ; son coefficient de surtension est : $Q = 1/CR\omega$. On a de même $E_c = E/CR\omega$.

1.4. — Le circuit oscillant parallèle.

Cette fois L et R sont en parallèle sur C (fig. 6 - 9), la résolution graphique s'opère en raisonnant sur les intensités qui parcourent les deux branches pour en tirer l'intensité totale.

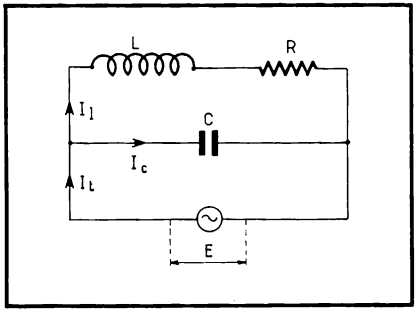


Fig. 6 - 9. — Circuit oscillant parallèle.

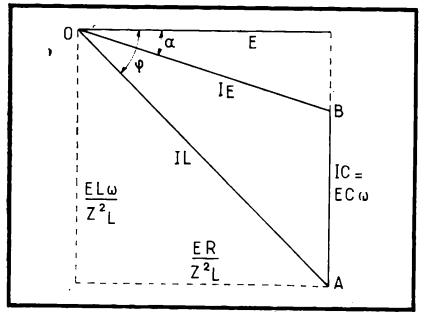


Fig. 6 - 10. — Résolution graphique du circuit oscillant parallèle lorsque le circuit est inductif.

Si E est la tension de la source, l'intensité dans la capacité est $I_c = EC\omega$. Elle est déphasée de 90° en avant sur E. L'intensité dans la bobine et dans la résistance est :

$$I_L = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}} \quad \text{ou} \quad Z_L = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$$

Elle est déphasée en arrière sur E d'un angle φ donné par : $\text{tg}\,\varphi = L\omega/R$. On trace une droite horizontale E représentant l'origine des déphasages. A partir de O, on porte le vecteur I_L déphasé en arrière d'un angle φ. Du point A ainsi obtenu, on trace A B perpendiculaire à l'horizontale E et déphasé de 90° en avant proportionnel à I_c. On obtient le vecteur O B proportionnel à I_t et déphasé de l'angle α par rapport à E. Ici aussi il faut distinguer trois cas :

$\frac{E\,L\,\omega}{Z_L^2}$ est plus grand que $EC\omega$ (fig. 6 - 10). Le circuit est *inductif* et I_t est déphasé en arrière sur E.

$\frac{E\,L\,\omega}{Z_L^2}$ est plus petit que $EC\omega$ (fig. 6 - 11). Le circuit est *capacitif* et I_t est déphasé en avant sur E.

$\frac{E\,L\,\omega}{Z_L^2}$ est égal à $EC\omega$ (fig. 6 - 12). Le circuit est en *résonance parallèle.* I_t est en phase avec E. Le courant qui parcourt le circuit est le plus faible.

Si R est très faible on peut le négliger. La condition de résonance se simplifie et devient :

$$\frac{1}{L\,\omega} = C\,\omega \qquad \text{ou} \qquad L\,\omega = \frac{1}{C\,\omega}$$

L'*impédance* du circuit à la résonance est $Z_R = \frac{E}{I_t}$

En se reportant à la figure 6 - 12 on voit que I_t est un des côtés du triangle rectangle O B A dont on connaît les deux autres côtés :

$$I_t = \frac{R\,E\,C\,\omega}{L\,\omega} = \frac{R\,E\,C}{L}$$

d'où $$Z_R = \frac{E}{I_t} = \frac{E\,L}{R\,E\,C} = \frac{L}{R\,C}$$

Si la résistance est nulle, l'impédance est infinie. Si elle est faible comme c'est généralement le cas, l'impédance du circuit est très élevée à la résonance.

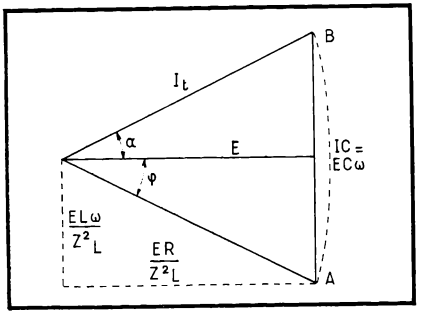


Fig. 6 - 11. — Résolution graphique du circuit oscillant parallèle lorsque le circuit est capacitif.

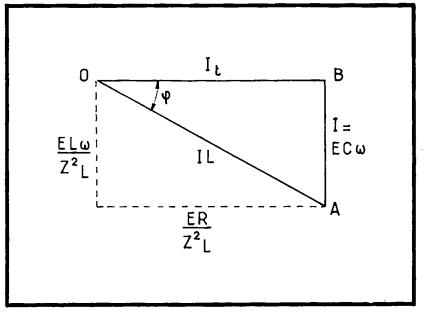


Fig. 6 - 12. — Résolution graphique du circuit oscillant parallèle à la résonance.

Le courant qui circule dans les éléments L et C est grand, tandis que le courant total est faible.

La fréquence de résonance est :

$$L\,\omega = \frac{1}{C\,\omega}$$

d'où $$\omega^2 = \frac{1}{L\,C} \qquad \omega = \frac{1}{\sqrt{L\,C}} \qquad \omega = 2\,\pi\,f$$

et $$f = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L\,C}}$$

C'est la formule de Thomson. f est en hertz lorsque L est en henry et C en farad.

Le coefficient de surtension Q des éléments L et C à la résonance joue ici un rôle analogue à celui étudié pour la résonance série. On a dans L :

$$I_L = \frac{L\,E\,\omega}{Z_L^2}$$

l'intensité totale :

$$I_t = \frac{E\ R}{Z_L^2}$$

en faisant le rapport de ces deux intensités on a :

$$\frac{I_L}{I_t} = \frac{L\ E\ \omega\ Z_L^2}{E\ R\ Z_L^2} = \frac{L\ \omega}{R}$$

Ici, le facteur Q multiplie le courant dans le circuit pour trouver le courant dans les éléments :

$$I_L = I_t\ Q$$

PARALLÈLE RÉSUMÉ ENTRE LES DEUX RÉSONANCES

Impédance	I_t	E aux bornes des éléments	I dans les éléments
Résonance série : $Z = R$ tend vers zéro lorsque R tend vers zéro.	max.	$E_c = E_L = EQ$	$I_L = I_c = I_t$
Résonance parallèle : $Z = \frac{L}{R\,C}$ tend vers l'infini lorsque R tend vers zéro.	min.	$E_c = E_L = E$	$I_L = I_c = I_tQ$

On voit que la résonance série est comparable à la résonance parallèle en inversant les termes E et I en passant de l'un à l'autre.

COURBE DE RÉSONANCE.

Elle est obtenue en étudiant le comportement de ces circuits pour des fréquences voisines de la résonance (fig. 6 - 13). On porte en ordonnées les valeurs de I ou de E, et en abscisses les différentes fréquences. On obtient dans les deux cas une courbe semblable et symétrique par rapport à la fréquence de

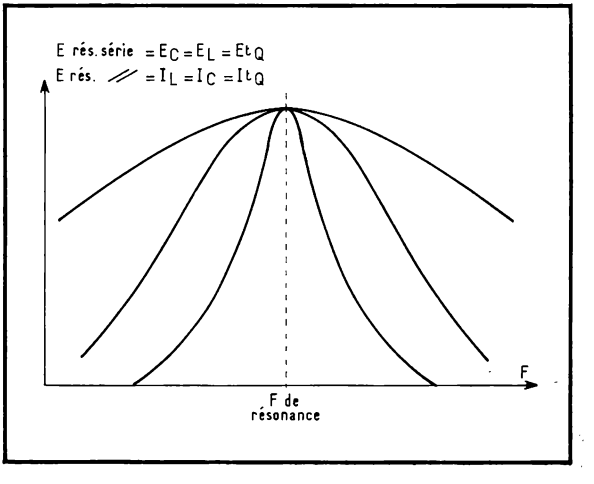


Fig. 6 - 13. — Courbes de résonance d'un circuit LC série ou parallèle.

résonance. Selon la valeur du coefficient de surtension du circuit on obtient une courbe plus ou moins pointue.

Ce type de circuit est donc capable de favoriser certaines fréquences au détriment des autres. Il est à la base de toute l'électronique. On le rencontre dans les filtres, dans les circuits d'accord, et il faut en tenir compte pour la réalisation de tous les appareils.

SÉLECTIVITÉ.

La sélectivité d'un circuit résonnant est sa qualité de favoriser la fréquence de résonance par rapport aux autres. On exprime la sélectivité S par rapport à I_{max}/I ou E_{max}/E en fonction du désaccord de fréquence $\Delta\omega$.

$$S^2 = 1 + 4\,Q^2\,\frac{(\Delta\omega)^2}{\omega^2}$$

Où, encore, on peut exprimer S en fonction de la constante de temps du circuit $2\,L/R = \theta$.

$$S = \sqrt{1 + \left(\frac{2\,L}{R}\,\Delta\omega\right)^2}$$

La sélectivité d'un circuit oscillant est d'autant plus grande que sa résistance est petite et que le coefficient de self-induction est plus grand.

2. — LES TOLES MAGNÉTIQUES.

Pour constituer le circuit magnétique des transformateurs d'alimentation, des inductances de filtre et des transformateurs B.F., il est nécessaire de disposer de tôles magnétiques qui peuvent être au silicium, ordinaires ou orientées, ou bien en alliages à haute perméabilité à base de nickel.

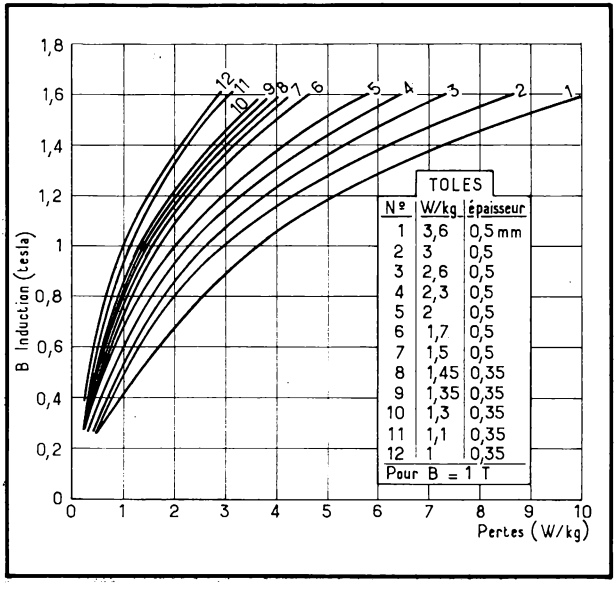


Fig. 6 - 14. — Pertes en fonction de l'induction pour les différentes qualités de tôle (Walzwerk Neviges).

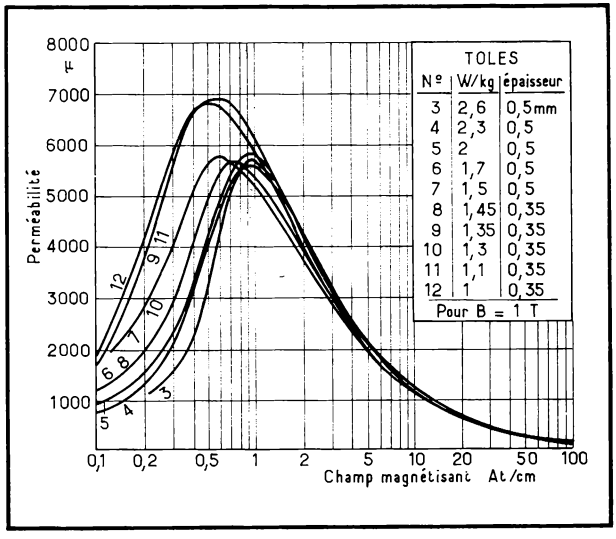


Fig. 6 - 15. — Perméabilité en fonction du champ magnétisant pour les différentes qualités de tôles (Walzwerk Neviges).

2.1. — Les tôles ordinaires au silicium.

L'adjonction de silicium dans le fer double sa résistance mécanique, quadruple son élasticité, réduit les pertes par hystérésis en améliorant sa structure cristalline, triple sa résistivité et de ce fait réduit les pertes par courants de Foucault.

Les tôles pour transformateur de faible puissance ont une épaisseur normalisée de 0,35 mm. Les tôles pour transformateur de puissance, les dynamos et génératrices ont une épaisseur de 0,5 mm. Pour le matériel grand public on utilise de préférence les tôles de 0,5 mm qui forment des circuits moins coûteux. Certaines firmes font fabriquer spécialement des tôles de 0,8 mm pour leurs transformateurs d'alimentation. Les pertes sont légèrement supérieures, mais le tôlage sur machine automatique s'effectue plus rapidement et plus facilement.

Elles sont légèrement cassantes. On doit les travailler à la cisaille ou au poinçon. Elles sont classées selon leurs pertes au kilogramme, c'est-à-dire en fonction de leur teneur en silicium.

Les tôles ordinaires avec 1 % de silicium présentent 3,6 W/kg de pertes pour une induction B de 1 tesla (10 000 gauss).

Les tôles de bonne qualité courante ont une teneur en silicium d'environ 2 % et ont 2,6 W/kg de pertes, toujours pour une induction de 1 tesla (T).

Les tôles de très bonne qualité ont près de 4 % de silicium et ont environ 1 W/kg de pertes pour 1 T. Les prix des tôles croissent en fonction de la teneur en silicium.

Pour éviter la création de courants de Foucault trop importants, il faut feuilleter les circuits magnétiques et pour cela isoler les tôles. Le traitement thermique qu'elles subissent pour stabiliser leurs caractéristiques les oxyde superficiellement. Cette oxydation est souvent suffisante. Cependant, pour le matériel professionnel on peut revêtir les tôles de vernis, de papier collé, d'une

fusion superficielle de poudre de magnésie ou de verre avec de la poudre de magnésie (Carlite).

Les tôles découpées doivent être nettes et sans bavures qui les mettraient en court-circuit augmentant les pertes.

Les courbes de la figure 6 - 14 donnent les pertes en fonction de l'induction pour les différentes qualités de tôles. La figure 6 - 15 montre les courbes de perméabilité en fonction du champ magnétisant, pour les mêmes types de tôles.

On voit que les pertes croissent très vite avec l'induction. C'est pourquoi on ne dépasse pas 1,4 T (14 000 gauss), valeur qui présente déjà des pertes doubles par rapport à 1 T. Exemple : une tôle 3,6 W/kg à 1 T, donne 7,3 W/kg à 1,4 T (courbe fig. 6 - 14).

La perméabilité passe par un maximum pour un champ magnétisant H compris entre 0,005 et 0,01 At/m (ampère-tour par mètre), et diminue ensuite très rapidement. Il est indispensable de calculer les transformateurs avec un champ peu élevé si on veut obtenir le meilleur rendement.

Les tôles pour circuits magnétiques doivent satisfaire aux conditions de la norme U.T.E. C 28-900 (1961).

DÉCOUPAGE.

Les tôles sont découpées selon plusieurs profils. On distingue :

LE DÉCOUPAGE « AMÉRICAIN » OU EN « E I ».

Ce découpage offre l'avantage de n'occasionner aucune perte de tôle (fig. 6 - 16). Les tôles sont découpées deux par deux et les « fenêtres » forment les I du circuit. En revanche, il a le désavantage de donner des surfaces de fenêtre un peu petites pour loger le bobinage. Il donne des transformateurs avec un excès de fer par rapport au cuivre utilisé ; or on obtient le meilleur rendement d'un transformateur lorsque les pertes dues au fer sont du même ordre de grandeur que les pertes dues au cuivre. Cela conduit à choisir obli-

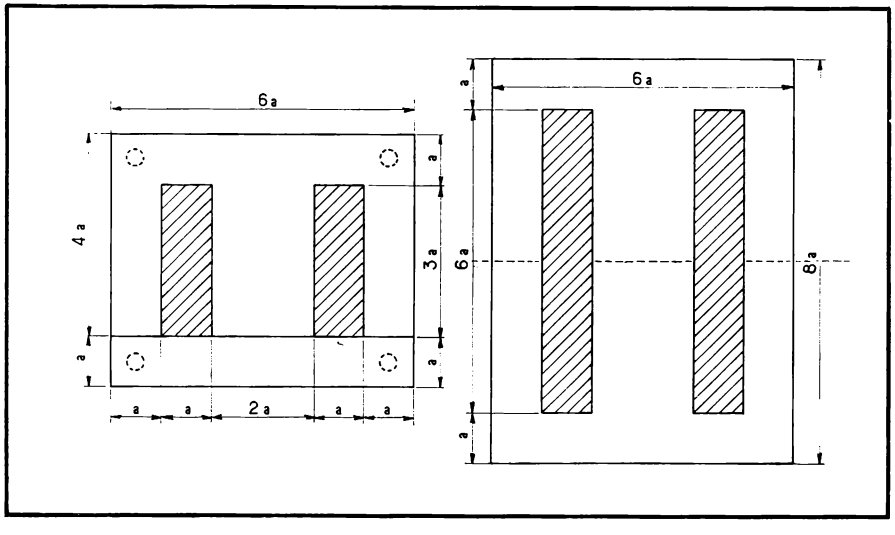


Fig. 6 - 16. — Découpage des tôles (type « américain » ou en « EI »).

gatoirement des tôles de bonne qualité, jusqu'à 2,6 W/kg, ou à adopter une autre découpe.

Elles sont universellement adoptées pour la fabrication de toutes les catégories de transformateurs, car elles sont les plus économiques, par suite de l'absence de chutes de tôle.

La constitution d'un entrefer est très facile, il suffit de glisser une feuille de papier d'épaisseur convenable entre le E et le I du circuit.

Les dimensions standard de découpe sont données par la spécification F.N.I.E. 036 (1963). Les dimensions sont fonction de la largeur de la fenêtre a (fig. 6 - 16). Le E a les dimensions suivantes : 6 a × 4 a, fenêtre 3 a × a, et le I : 6 a × a.

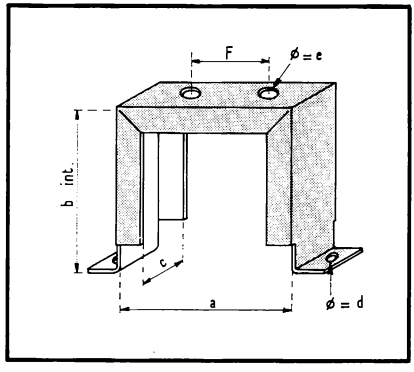


Fig. 6 - 17. — Etrier pour le maintien des circuits magnétiques de petites dimensions. Plus petit étrier, pour circuit 30 × 25 mm; plus grand étrier, pour circuit 75×62,5 mm.

On observe que le meilleur rendement est obtenu lorsque la section du circuit est carrée. Elle est donnée par les dimensions de la partie centrale du E. Comme elle mesure 2 a de large, si on admet 2 a d'épaisseur, la section brute du circuit est de 4 a^2. Mais, il faut tenir compte du *foisonnement* des tôles, elles ne sont pas parfaitement planes et elles sont isolées. Le volume réel de fer est inférieur de 5 à 10 % au volume occupé. Donc, la section effective est 3,8 a^2. La longueur moyenne des lignes de force : 12 a. Le volume total du fer est 48 a^3. Le poids du fer (densité 7,5) est de 0,33 a^3 en kg et les pertes dans le fer pour des tôles de 1,5 W/kg sont de 1,06 a^3 en W, pour une induction de 1,2 T.

On voit que pour les calculs de circuit cette tôle est intéressante car tout découle de la largeur de la fenêtre.

Les petites tôles (jusqu'à 75 × 62,5 mm) forment des circuits qui sont souvent maintenus par des étriers (fig. 6 - 17).

Au-delà les tôles sont livrées avec un trou à chaque angle (en pointillés sur la figure 6 - 16). Les circuits magnétiques sont alors maintenus par quatre tiges filetées. Ces tiges doivent être d'un diamètre légèrement plus petit que celui des trous afin de ne pas court-circuiter les tôles et augmenter les pertes.

Lorsqu'on cherche à réduire le plus possible l'entrefer naturel dû à cette découpe, il faut « *imbriquer* » les tôles lors de l'empilage. C'est-à-dire, qu'une tôle est placée avec le I vers la droite, par exemple, et que la suivante est orientée en sens inverse, le I vers la gauche.

De plus, pour réduire le foisonnement et éviter les vibrations, il faut serrer les tôles d'une façon très énergique, soit au moyen de l'étrier, soit au moyen des tiges filetées.

LES DÉCOUPAGES DÉRIVÉS DU TYPE AMERICAIN, OU CIRCUITS « M I ».

Dans tous ces circuits on a élargi la « fenêtre » de façon à avoir plus de facilité pour la réalisation du bobinage. En revanche, le rapport entre les dimensions n'existe plus et on doit accepter des pertes de tôle lors de la découpe.

Il existe un très grand nombre de modèles de cette catégorie de découpe qui sont utilisés pour la fabrication de tous les types de transformateurs.

LA DÉCOUPE CUIRASSÉE OU FRANÇAISE.

C'est un circuit fermé cisaillé dont, bien entendu, la tôle correspondant à l'ouverture des fenêtres est perdue (fig. 6 - 18). Afin de pouvoir enfiler le bobinage, deux fentes sont prévues pour libérer la jambe centrale du circuit. Cette découpe ne convient pas pour les circuits devant avoir un entrefer. Elle est bien adaptée pour la fabrication des transformateurs d'alimentation. Même avec des tôles 3,6 W/kg, les pertes sont bien équilibrées entre le fer et le cuivre. La surface des fenêtres est suffisante, même pour les bobinages complexes. Afin d'avoir une idée de la proportion des dimensions, il a été pris en exemple une tôle carrée pour transformateurs de 75 W (75 × 75 mm). Les tôles peuvent être carrées ou rectangulaires et il en existe un grand nombre de modèles depuis 60 × 50 mm jusqu'à 135 × 140 mm.

Elles sont fixées par quatre tiges filetées fixées généralement au châssis. Un boîtier embouti blinde la partie supérieure du transformateur. Ce montage s'appelle « semi-encastré ».

Les transformateurs peuvent également être placés dans un blindage complet à fermeture étanche pour une protection complète. En particulier aux U.S.A., cette présentation est obligatoire pour des raisons de sécurité d'utilisation.

LES DÉCOUPES SPÉCIALES.

Elles sont réalisées à la demande des industriels pour des applications particulières ; elles sont très nombreuses, mais se rattachent aux principes généraux qui viennent d'être exposés.

2.2. — Les tôles au silicium orientées pour circuits normaux et pour circuits en C.

L'alliage contient entre 3 % et 4 % de silicium selon les fabricants. Les tôles sont laminées à froid puis sont recuites avec une traction mécanique entre 1 100 et 1 200° C. Dans ces conditions, on observe un réalignement systématique de la plupart des cristaux constituant la structure élémentaire des atomes dans le sens du laminage.

Le montage du circuit magnétique doit être prévu de telle façon que le flux doit demeurer parallèle à l'orientation des molécules.

Ces tôles sont utilisées pour la fabrication des circuits magnétiques des transformateurs industriels de grande puissance, car elles permettent de réduire leurs dimensions et leur poids par suite de leurs qualités.

En ce qui nous concerne, ces tôles sont surtout employées pour la fabrication des circuits en C, pour les transformateurs d'alimentation professionnels et pour les transformateurs B.F. à haute fidélité.

Les épaisseurs les plus courantes sont 0,35 mm pour le fonctionnement à 50 Hz et 0,10 mm pour les transformateurs d'alimentation pour l'aviation à 400 Hz et pour les transformateurs B.F. Pour certaines applications en impulsions on utilise des tôles de 0,05 mm d'épaisseur.

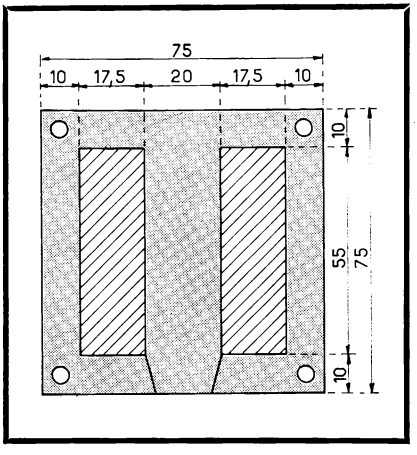


Fig. 6 - 18. — Découpage type « cuirassé ». Exemple pour 75 W.

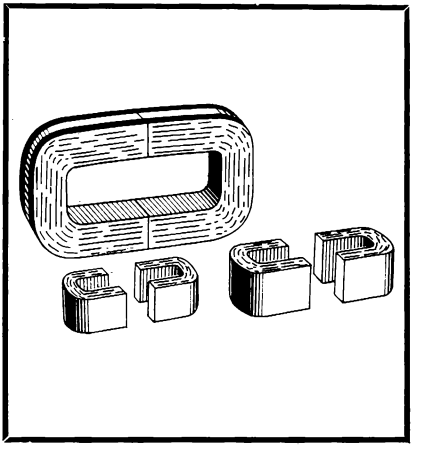


Fig. 6 - 19. — Anneau de circuit C en cours de fabrication. On voit un anneau complet cerclé et deux anneaux coupés.

Ces tôles sont isolées, soit par leur oxydation naturelle lors du recuit, soit par un revêtement de silicate de magnésie ou de Carlite.

Les circuits en C font l'objet des spécifications C.C.T. 06-01 A (1962), U.T.E. C 28-920 et C.C.T. 06-03 (1960), F.N.I.E. 013 pour leurs accessoires de montage.

La tôle, découpée en bande à la largeur voulue, est enroulée sur un gabarit rectangulaire aux coins arrondis de façon à former un anneau dont l'épaisseur est fonction du nombre de spires et donne la largeur du circuit magnétique. La largeur de la bande détermine l'épaisseur du circuit selon les données habituelles (fig. 6 - 19). L'anneau est imprégné sous vide avec un plastique thermo-durcissable de façon à coller les spires et à le rendre rigide. Puis, il est scié en son milieu ce qui donne deux C, d'où le nom donné à ce type de circuit. Les deux moitiés sont numérotées de façon à les remonter ensemble et dans le bon sens. Cette coupure doit être faite avec beaucoup de soin pour que l'entrefer soit le plus réduit possible (environ 0,03 mm). Si le transformateur nécessite un entrefer on intercale une feuille de papier d'épaisseur voulue dans la coupure.

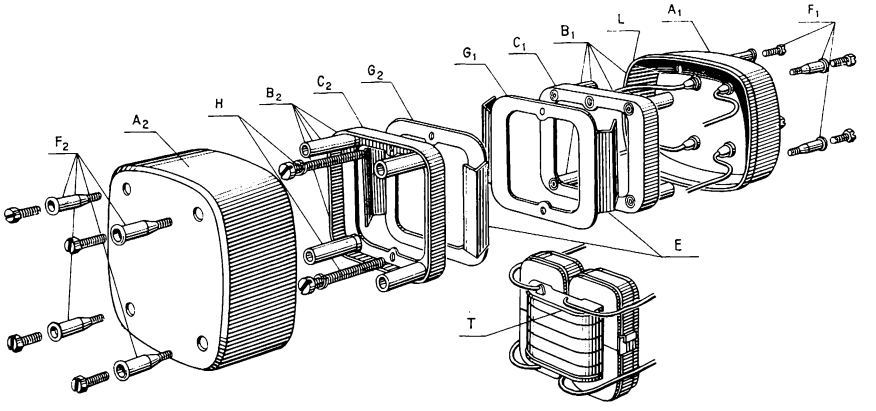


Fig. 6 - 20. — Détail d'un bobinage à circuit cuirassé (quatre C) et du boîtier étanche prévu pour le recevoir (Aciéries d'Imphy).

Pour former un circuit cuirassé, ce qui est le plus courant, on doit prévoir deux anneaux complets d'où quatre C.

Après tout traitement mécanique, il faut effectuer un dernier recuit sous atmosphère d'hydrogène sans carbone entre 780° C et 800° C afin de redonner à la tôle toutes ses qualités.

Puis le bobinage est réalisé et les quatre C sont placés autour dans le bon sens. Pour les maintenir bien serrés sans qu'ils puissent se déplacer, il faut les cercler avec une bande en acier doux étamé. Une agrafe étamée également serre la bande, elle permet donc la soudure à l'étain. Une pince dynamométrique assure le serrage contrôlé de la bande entre 18 et 70 kg selon ses dimensions.

Cet ensemble, bobinage et circuit magnétique, est généralement monté dans un boîtier en tôle d'acier emboutie étamée. Les deux coquilles s'emboîtent parfaitement et peuvent être soudées, rendant le boîtier étanche. Les sorties se font au moyen de perles de verre. Un orifice, qui est ensuite soudé, permet l'imprégnation du bobinage et le remplissage du boîtier. On utilise généralement de l'huile minérale (fig. 6 - 20).

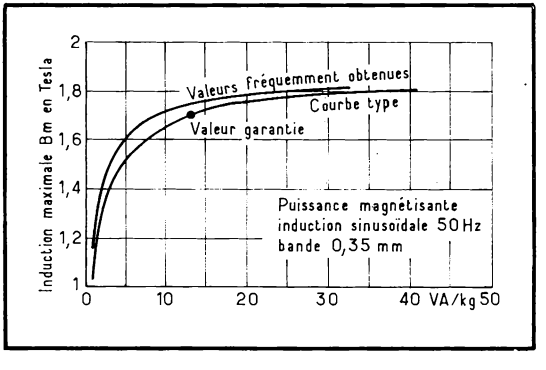


Fig. 6 - 21. — Puissance magnétisante en VA/kg pour obtenir une induction donnée (Aciéries d'Imphy).

AVANTAGES.

Les avantages des circuits en C en tôle orientée sont :

a) *Réduction jusqu'à 75 % des V A magnétisants* pour produire une certaine densité de flux (fig. 6 - 21).

b) *Réduction de 45 % des pertes* dans le fer pour une densité de flux donnée et augmentation de 30 % de la densité de flux admissible en respectant la direction du laminage (fig. 6 - 22).

Circuit réalisé en bande de 0,35 mm à 50 Hz : induction maximale utilisable : 1,7 T ; pertes inférieures ou égales à 2,2 W/kg ; à 1 T, pertes de l'ordre de 0,8 W/kg ; puissance magnétisante inférieure ou égale à 13 V A/kg. Ces circuits sont utilisables jusqu'à 400 Hz.

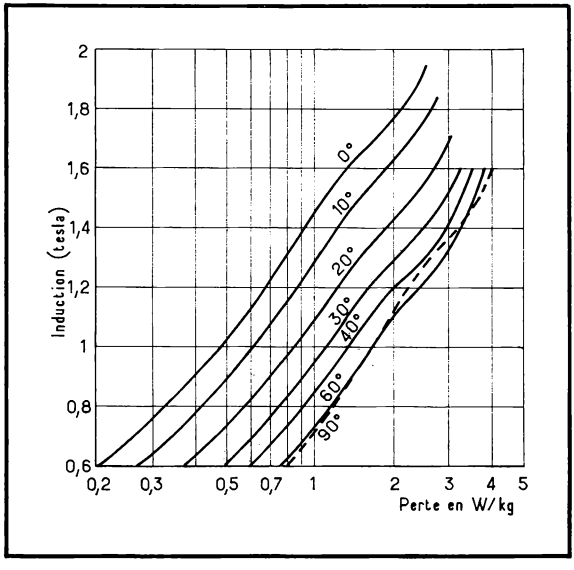


Fig. 6 - 22. — Pertes en W/kg en fonction de l'induction par rapport à la direction du laminage. Tôle ARMCO M 6, orientée de 0,35 mm.

Circuit réalisé en bande de 0,10 mm à 400 Hz : induction maximale utilisable 1,5 T ; pertes inférieures ou égales à 2,2 W/kg ; puissance magnétisante inférieure ou égale à 24 V A/kg. Ces circuits sont utilisables jusqu'à 5 000 Hz (fig. 6 - 23 et 6 - 24).

c) *Augmentation de la perméabilité efficace,* ce qui est important pour les transformateurs B.F. et les filtres qui travaillent à une faible induction.

d) *Réduction du flux de fuite* par concentration du champ magnétique.

e) *Amélioration du coefficient de remplissage* qui dépasse 95 %. Ceci est dû à la minceur de l'isolant sur les tôles et à la tension mécanique opérée au cours du bobinage.

f) *Réduction du temps de montage* du circuit magnétique et réduction de volume et de poids des appareils.

UTILISATION.

— Circuit en 0,35 : transformateurs d'alimentation pour secteur 50 Hz, et inductances de filtre.

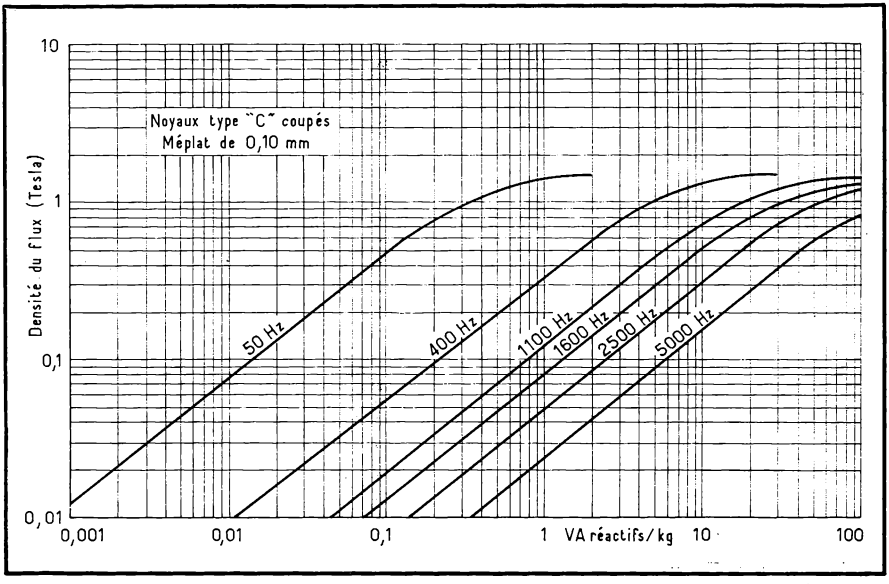


Fig. 6 - 23. — VA/kg magnétisants en fonction de l'induction et pour un courant alternatif compris entre 50 Hz et 5 000 Hz. Circuit English Electric **de 0,10 mm.**

— Circuit en 0,10 : transformateurs d'alimentation pour 400 Hz, inductances de filtre, transformateurs B.F.

— Circuit en 0,05 : transformateurs pour impulsions jusqu'à 200 kHz.

Il existe également des tôles en E I orientées en 0,35 mm d'épaisseur, destinées à la fabrication classique de transformateurs de haute qualité.

2.3. — Les alliages au nickel.

Ce sont des alliages à haute perméabilité et à faibles pertes. On distingue trois catégories :

— *Les alliages à 77 % de nickel* (*Mumétal*) offrent une perméabilité extrêmement élevée et de très faibles pertes dans le domaine des courants faibles. Ils sont limités à des champs magnétiques inférieurs à 0,08 At/cm et à une induction inférieure à 0,4 T.

— *Les alliages à 50 % de nickel* (*Anhyster D*) admettent des champs plus élevés jusqu'à 0,16 At/cm et une induction de 0,6 T.

— *Les alliages à 36 % de nickel* (*Anhyster B*) n'ont pas des caractéristiques aussi poussées. Ils offrent l'avantage d'une résistivité élevée qui entraîne une réduction des pertes par courant de Foucault. Ils sont moins sensibles aux déformations mécaniques. Enfin, ils admettent des champs et des inductions magnétiques un peu plus élevés.

Il existe un grand nombre de variétés de ces trois alliages de base dans les catalogues des principaux constructeurs. Les variantes se rapportent à des traitements thermiques différents et depuis peu à une orientation des cristaux.

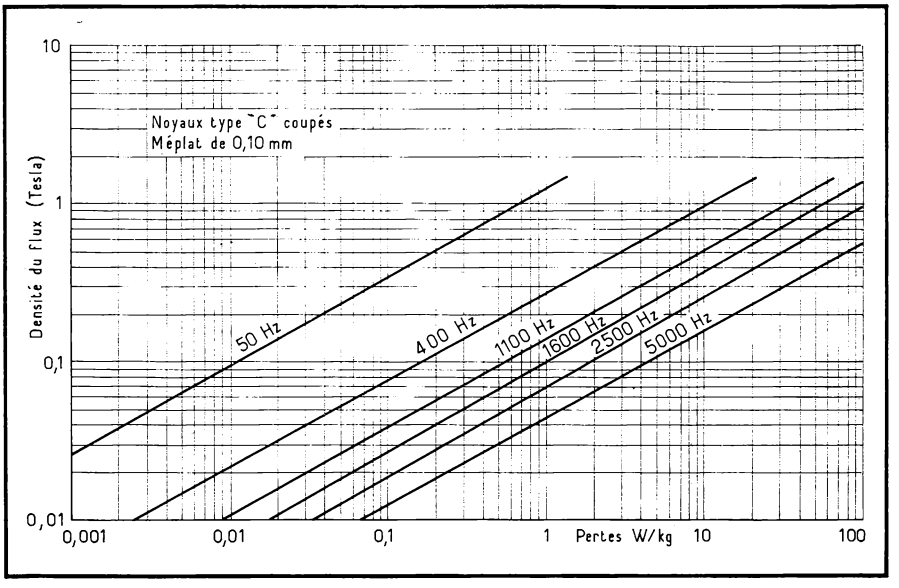


Fig. 6 - 24. — Pertes en W/kg en fonction de l'induction et pour un courant alternatif compris entre 50 Hz et 5 000 Hz. Circuit English Electric de 0,10 mm.

Ainsi l'alliage à 50 % de nickel orienté (*Rectimphy*) présente un cycle d'hystérésis rectangulaire ; il est particulièrement indiqué pour les amplificateurs magnétiques, différents servo-mécanismes et les mémoires de calculateurs.

Ces alliages sont particulièrement sensibles aux chocs et aux déformations mécaniques qui leur font perdre leurs qualités magnétiques. Si les tôles, ou les circuits doivent être usinés, ne serait-ce que le fait de percer un trou, il faut leur faire subir un traitement thermique approprié avant montage. Ensuite, il faut les manipuler avec précaution.

Dans ces conditions, les bandes, les profils et les pièces qui doivent être usinés sont livrés à l'état écroui. Lorsqu'ils sont dans leur état final, prêts au montage, ils sont livrés directement à l'état recuit. Le fournisseur se charge du traitement thermique final pour les pièces qui ont été livrées à l'état écroui afin de leur donner leurs caractéristiques définitives.

Le tableau ci-après donne les principales caractéristiques des alliages fabriqués par les *Aciéries d'Imphy*. Les alliages qui ont une même composition chimique diffèrent par les traitements thermiques qu'ils ont subi.

Il faut remarquer les pertes totales extrêmement faibles dans les conditions optimales de fonctionnement.

La figure 6 - 25 permet de comparer la perméabilité du fer au silicium avec celle des alliages au nickel en fonction du champ en courant continu.

La figure 6 - 26 donne les courbes de perméabilité en fonction du champ magnétique et de l'induction pour les trois principaux alliages.

Enfin, la figure 6 - 27 montre la modicité des pertes pour ces mêmes alliages.

Caractéristiques	Anhyster B	Supranhyster 36	Anhyster D	Supranhyster 50	Mumétal	Permimphy 77	Supermimphy 77
Composition chimique	Ni 36 Fe 64	Ni 36 Fe 64	Ni 50 Fe 50	Ni 50 Fe 50	Ni 77 Fe 19 Mo 4	Ni 77 Fe 19 Mo 4	Ni 77 Fe 19 Mo 4
Résistivité $\mu\Omega$.cm	75	75	45	45	58	58	58
Point de Curie ° C	230° C	230° C	450° C	450° C	350° C	350° C	350° C
Poids spécifique	8,1	8,1	8,2	8,2	8,7	8,7	8,7
Perméabilité à 0,004 At/cm (50 Hz).	2 000	2 500	2 800	5 000	35 000	50 000	80 000
Perméabilité maximale à 50 Hz	7 000	20 000	40 000	60 000	100 000	150 000	250 000
Induction pour μ max. à 50 Hz en tesla	0,65	0,6	0,9	0,9	0,3	0,3	0,3
Induction à saturation T	1,2	1,25	1,5	1,55	0,75	0,78	0,8
Champ coercitif At/cm après saturation en C.C.	0,56	0,16	0,08	0,048	0,016	0,012	0,08
Pertes totales en W/kg :							
à 50 Hz et 0,5 T		0,13	0,1	0,08	0,045	0,025	0,02
à 50 Hz et 1 T	1,1	0,5	0,4	0,3			
à 400 Hz et 0,5 T		1,3	1,3	1	0,5	0,25	0,2
à 400 Hz et 1 T		4	5	4			
Utilisations	Transformateurs B. F, filtres, blocking, impulsions.		Transformateurs, appareils de mesure, pièces polaires, noyaux pour relais, blindages, magnétostriction.		Transformateurs d'intensité, transformateurs B. F. haute fidélité, inductances, filtres, réactances, blindages, appareils de mesure, relais, têtes magnétophone.		

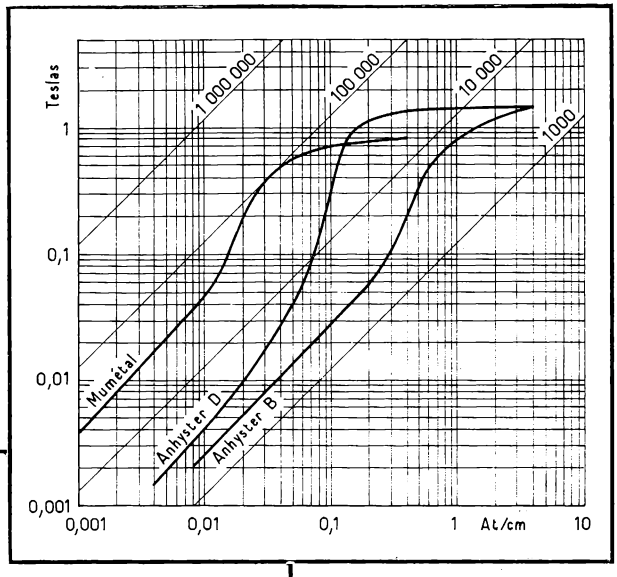


Fig. 6 - 25 (Ci-dessous). — Comparaison de la perméabilité du fer au silicium et des alliages au nickel en fonction du champ en courant continu (Aciéries d'Imphy).

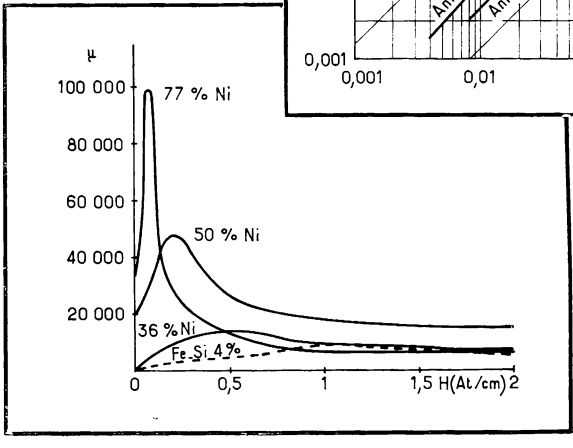
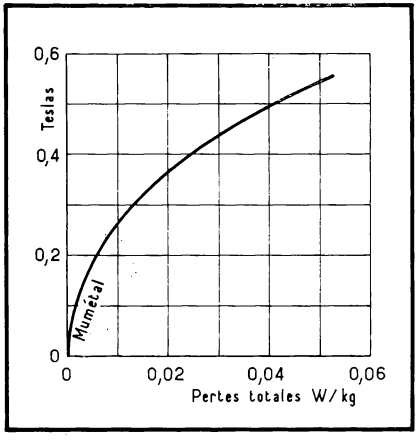


Fig. 6 - 26 (Ci-dessus). — Perméabilité en fonction de l'induction et du champ pour les alliages au nickel (Aciéries d'Imphy).



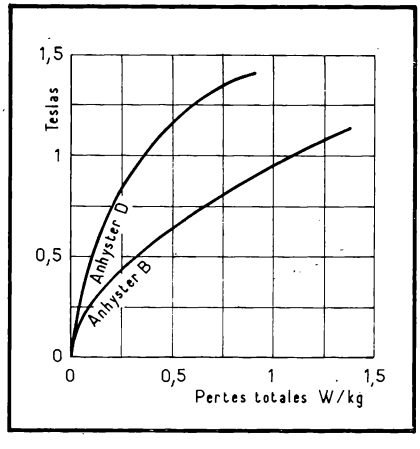


Fig. 6 - 27. — Pertes totales en fonction de l'induction pour les alliages au nickel (Aciéries d'Imphy). **A gauche, pour le mumétal ; à droite, pour les Anhyster B et D.**

UTILISATION.

Pour les industriels de l'électronique, les fournisseurs livrent des tôles en découpe américaine E I, des tôles cuirassées, et des tores de différentes dimensions. Ces pièces sont généralement isolées au moyen d'un vernis.

On peut également se procurer des circuits en C et des blindages, soit pour les transformateurs et les têtes magnétiques, soit pour les tubes cathodiques.

Il existe des tôles très petites pour les transformateurs des circuits transistorisés miniatures.

3. — LE FIL DE CUIVRE.

Le fil de cuivre utilisé pour le bobinage des transformateurs d'alimentation, les inductances de filtre et les transformateurs B.F. est toujours isolé.

C'est un fil de cuivre électrolytique très pur et recuit pour être suffisamment malléable ; ses principales caractéristiques sont :

Densité à 20° C : 8,89 g/cm³.

Température de fusion : 1 080° C.

Conductibilité thermique : 0,94 cal/cm²/cm/°C/s.

Coefficient de dilatation linéaire par ° C : 0,000017 m/m/°C.

Charge de rupture : 22 à 28 kg/mm², selon la section.

Allongement après rupture : 14 à 35 %, selon la section.

Résistivité à 20° C : 0,017241 Ω/mm²/m.

Coefficient de température au voisinage de 20° C : 0,00393.

Ces fils répondent aux normes suivantes :

U.T.E. C 30-100 (1955) ; fils et câbles électriques.

U.T.E. C 31-111 (1952) ; fils de cuivre recuit nus circulaires.

U.T.E. C 31-112 (1952) ; fils de cuivre dur nus circulaires.

Il s'agit ici seulement des fils pour les appareils de faible puissance. Les barres à section rondes, carrées ou rectangulaires utilisées sur les transformateurs industriels à grande puissance sortent du cadre de cette étude.

Les fils pour la haute fréquence seront étudiés au chapitre VII.

La gamme normale de fabrication des fils recuits circulaires s'étend de 0,020 mm à 6,30 mm, tolérances : jusqu'à 0,5 mm ± 5 μ, au-dessus ± 1 %. Ces fils peuvent être livrés étamés entre 0,040 mm et 4 mm (norme C 32-010 — 1954 — pour l'adhérence de la couche d'étain).

Pour son isolement, le fil peut être guipé ou émaillé.

3.1. — Le fil guipé.

On dit qu'un fil est guipé lorsqu'il est recouvert d'une ou de plusieurs couches de soie, de rayonne, de nylon, de coton, de papier ou de plastique.

Ces isolants doivent être imprégnés pour donner une sécurité de fonctionnement satisfaisante.

Les fils guipés à la soie, à la rayonne ou au nylon sont utilisés en haute fréquence, et seront étudiés au chapitre VII.

Les fils guipés au papier ou au plastique sont employés dans les câbles téléphoniques sous plomb.

Les fils entourés de coton sont à peu près complètement abandonnés.

Pour les applications qui font l'objet de ce chapitre les fils guipés ne sont pratiquement pas utilisés.

3.2. — Le fil émaillé.

Ce revêtement est universellement adopté pour les applications en courant industriel et en B.F. En effet, les différents émaux résistent mieux à la chaleur, à l'humidité, et sont plus fiables que les guipages.

3.2.1. — *FABRICATION.*

L'émail doit être déposé en couche aussi mince que possible, sans formation de gouttes irrégulières, sans manque, sans irrégularités de surface, sans craquelures ni fêlures.

Il doit être suffisamment souple afin de permettre le pliage du fil sans cassure. Il doit adhérer parfaitement au fil, ne pas s'écailler si on le gratte à l'ongle, ne pas s'altérer à l'humidité, être ininflammable, ne pas oxyder le fil et admettre les principaux imprégnants.

Toutes ces exigences sont satisfaites avec les différents émaux modernes et grâce aux méthodes de fabrication et de contrôle actuelles.

Pour plus de sécurité on préfère revêtir le fil de plusieurs couches très minces plutôt que par une couche plus épaisse. Ainsi, par exemple, un fil de 0,1 mm est revêtu de 6 couches d'émail d'une épaisseur totale de 16 μ.

On fait passer le fil dans un réservoir d'émail, puis immédiatement dans un four tunnel, cela six fois de suite.

Il existe des machines horizontales et des machines verticales.

Les machines horizontales sont réservées à l'émaillage des fils très fins qui risquent ainsi beaucoup moins de se casser. Cependant leur longueur est limitée par la flèche que prend le fil en fonction de la tension mécanique.

Les machines verticales sont utilisées pour les fils plus gros. Elles peuvent avoir jusqu'à 10 m de hauteur. Le réservoir d'émail est en bas ; il est muni de fentes et d'un tambour pour maintenir et guider le fil. Le four vertical peut être plus long, ainsi le fil est mieux séché, ou la vitesse de fabrication est plus rapide, en fonction de sa section. L'opération de chargement de la machine est assez longue et l'entraînement du fil doit être très régulier pour éviter les cassures en cours de fabrication.

Les fils sont soumis à des essais normalisés afin d'assurer l'utilisateur de leurs caractéristiques. Celui-ci vérifie parfois à la livraison les manques d'émail au moyen d'une machine à compteur faisant défiler le fil dans un godet rempli de mercure. Une différence de potentiel est appliquée entre le fil et le mercure. Chaque manque d'émail, fissure ou craquelure établit le contact et déclenche le compteur. Les normes prescrivent :

— moins de 45 défauts aux 100 m pour un fil revêtu « d'émail simple »,

— moins de 30 défauts aux 100 m pour un fil « émail renforcé »,

— moins de 10 défauts aux 100 m pour un fil « double émail ».

Un fil « simple émail » comporte en réalité 6 couches d'émail, on en compte 9 pour un « émail renforcé » et 12 pour un « double émail », cela pour un fil de diamètre moyen.

3.2.2. — *DIFFÉRENTS ÉMAUX.*

Les émaux ont évolué très rapidement depuis quelques années. A l'origine, l'émail appelé « *vernis gras* » était composé de résines naturelles (colophane, copal) mélangées à des huiles siccatives (huile de lin, huile de bois de Chine).

Actuellement on emploie des résines et des huiles synthétiques. Un émail est donc un mélange de constituants flexibles (huiles) et de constituants rigides (résines) qui, bien fixé au fil, s'étire avec lui sans rupture, possède une bonne flexibilité tout en conservant une dureté satisfaisante.

Les constituants synthétiques se polymérisent à chaud de deux façons différentes selon leur nature. Certains opèrent une véritable transformation chimique donnant des réseaux tridimensionnels à chaîne solide, ce sont les émaux *thermodurcissables*. D'autres ont plutôt un séchage physique, les chaînes restent lâches et toutes les molécules ne se lient pas ensemble. L'émail peut être à nouveau soluble, il est *thermoplastique*.

Les différentes catégories sont les suivantes :

— *L'émail au vernis gras* (norme U.T.E. C 31-410 — 1953) ; température maximale en service normal : 105° C ; il n'est pratiquement plus utilisé.

— *L'émail au vernis synthétique* (norme U.T.E. C 31-420 — 1954) ; température maximale en service normal : 120° C.

Il est composé de formal polyvinylique (thermoplastique) et de bakélite qui rend le mélange thermodurcissable. La cuisson s'effectue entre 250 et 300° C. Il existe en émail simple, émail renforcé et double émail.

Les tensions d'essai minimales en fonction du diamètre du fil et du type d'émail sont données par le tableau ci-dessous :

Diamètre nominal (mm)	Tension d'essai minimale (V) en courant alternatif sur mandrin de 12 mm fil ∅ < 0,50 mm		
	Email simple	Email renforcé	Email double
0,03 ⩽ ∅ < 0,05	150		
0,05 ⩽ ∅ < 0,09	180	250	350
0,09 ⩽ ∅ < 0,11	200	300	400
0,11 ⩽ ∅ < 0,16	250	350	500
0,16 ⩽ ∅ < 0,22	250	400	600
0,22 ⩽ ∅ < 0,26	300	500	750
0,26 ⩽ ∅ < 0,50	300	600	900

— *L'émail au vernis synthétique dit « soudable »* (norme en projet) ; température maximale en service normal : 120° C.

C'est un émail à base de résine polyuréthane qui, plongé dans un bain de soudure à l'étain (60 % étain, 40 % plomb), fond et permet le décapage instantané du fil et son étamage sans avoir à gratter l'émail.

Il est très intéressant sur les fils fins qui étaient très difficiles à dénuder sans les casser. Il permet une plus grande rapidité de fabrication des petits bobinages.

Pour un étamage rapide et complet la température optimale du bain de soudure est de 365° C ± 5° C. Il ne faut pas descendre au-dessous de 320° C, car la prise de la soudure ne se fait plus, ni monter au-dessus de 380° C, car l'oxydation du bain est trop rapide.

Ce fil est livrable en émail simple, émail renforcé et double émail.

— *L'émail au vernis synthétique dit « thermo-adhérent »* (norme en projet) ; température maximale en service normal : 120° C.

Ces conducteurs sont isolés à l'émail synthétique, ou à l'émail soudable, puis ils sont recouverts d'une mince couche thermoplastique à base de butyral polyvinylique.

La surépaisseur des fils normaux due à la couche thermoplastique est de 7 μ pour un fil de 0,08 mm et de 22 μ pour un fil de 0,5 mm.

Ces conducteurs se soudent entre eux par simple chauffage.

Agglomération par passage à l'étuve : Placer le bobinage dans une étuve à 125-130° C pendant un temps à déterminer en fonction du volume et de la forme du bobinage.

Agglomération par effet Joule : On fait passer un certain courant sous une certaine tension déterminés selon le volume et la forme du bobinage, de façon que la température du fil atteigne 125 à 130° C.

Ce fil est très intéressant pour la fabrication des bobines de déviation des récepteurs de télévision.

— *L'émail au vernis synthétique à haute température;* température maximale en service normal : 155° C.

Cet émail est à base de résine téréphtalique qui est surtout employée pour la fabrication des moteurs qui doivent être légers et occuper un faible encombrement.

Les fils sont livrables en émail simple, émail renforcé, double émail.

— *Conducteurs isolés au « Téflon »* (polytétrafluoréthylène) ; température maximale en service normal : 250° C. Ce sont des fils réservés pour des applications professionnelles spéciales.

4. — LES ISOLANTS.

Dans un bobinage l'isolement entre spires est assuré par le revêtement du fil (guipage ou émaillage). Il est nécessaire de disposer d'autres isolants pour séparer les couches entre elles, pour isoler le bobinage de la masse et des autres bobinages. Enfin, il faut imprégner les enroulements pour éviter l'action de l'humidité.

4.1. — Isolement entre couches.

Lorsque la différence de potentiel entre la première spire d'une couche et la dernière spire de la couche supérieure dépasse 25 V, il faut prévoir un isolement entre couches. En effet, ces deux spires sont en contact direct et leur isolement est assuré par leur revêtement d'émail.

En général on utilise du papier spécial : papier cristal, papier kraft électrique, papier paraffiné ou huilé.

Pour les transformateurs destinés à fonctionner à haute température (au-dessus de 120° C) le papier n'offre pas une sécurité suffisante et on doit le remplacer par des films plastiques (Mylar, Terphane) ou du genre *Téflon* qui tiennent jusqu'à 250° C.

Lorsque la d.d.p. maximale entre couches est comprise entre 25 V et 75 V, il faut placer une feuille de papier de 0,03 mm. Entre 75 V et 150 V, on intercale deux feuilles de 0,03 mm. On préfère utiliser deux feuilles minces plutôt qu'une feuille épaisse, car les défauts d'une feuille sont masqués par l'autre et la sécurité est meilleure. Enfin, entre 150 V et 300 V, il faut intercaler trois feuilles, toujours de 0,03 mm.

La feuille de papier doit être plus large que le bobinage (2 à 5 mm) surtout si le mandrin ne comporte pas de joues, afin que les spires ne puissent pas glisser sur le côté et échapper à l'isolement du papier. On livre également des bandes de papier crantées sur les deux côtés pour être utilisées avec les bobines à joues.

Les feuilles de plastique peuvent être légèrement plus minces, elles ne comportent pas de défauts et supportent des tensions supérieures.

Les tensions de claquage moyennes données par les différents fabricants et auteurs sont très différentes. En effet, les conditions d'expérimentation sont difficiles à définir avec précision.

Le papier cristal est livré généralement en 0,03 mm d'épaisseur (tension de claquage environ 1 000 V).

Le papier *kraft* électrique est livré entre 0,03 mm (400 V) et 0,12 mm (1 200 V).

Le film de *Téflon* supporte 4 000 V pour 0,025 mm d'épaisseur et 30 000 V pour 0,5 mm.

4.2. — Isolement des bobinages entre eux et par rapport à la masse.

La norme U.T.E. prescrit d'appliquer une tension d'essai de 2 U + 1 000 entre les différents enroulements et par rapport à la masse.

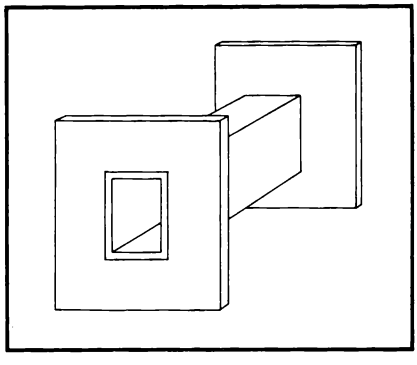


Fig. 6 - 28. — Carcasse en bakélite avec joues en presspahn collées.

Pour les petits transformateurs d'alimentation branchés sur le secteur monophasé de tension maximale de 250 V, la tension d'essai ($2 \times 250 + 1\,000$) est de 1 500 V. Les fabricants adoptent généralement 2 000 V pour plus de sécurité.

L'isolement nécessaire est constitué par la carcasse ou par le caniveau placé sur le circuit magnétique et qui supporte les enroulements et par les feuilles de papier ou de carton bakélisé qui les séparent entre eux.

Il existe un grand nombre de modèles de carcasses. Elles peuvent être en carton bakélisé découpé et collé, en noyau de bakélite moulé avec des joues en presspahn collées (fig. 6 - 28). Les petits modèles sont généralement moulés en nylon ou en rilsan avec des fentes prévues pour recevoir le fil et fixer les sorties ; les ancrages en fil de cuivre étamé sont parfois moulés avec la carcasse (fig. 6 - 29).

L'épaisseur des carcasses est comprise entre 1 et 2 mm selon les dimensions. Pour le carton bakélisé (presspahn ou carte de Lyon), on obtient les tensions moyennes de claquage de :

Pour une épaisseur de 0,05 mm : 500 V.
0,10 mm : 800 V.
0,15 mm : 1 200 V.
0,20 mm : 1 600 V.
0,50 mm : 4 000 V.
1 mm : 8 000 V.

Le coefficient de sécurité adopté entre la tension d'essai U.T.E. et la tension moyenne de claquage est généralement de 5.

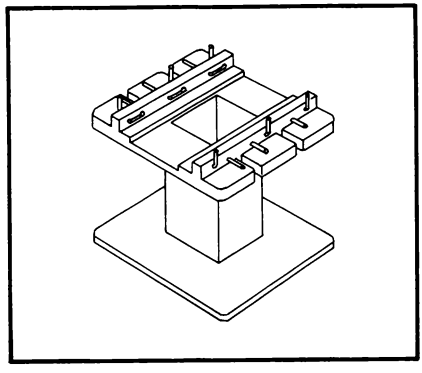


Fig. 6 - 29. — Carcasse miniature moulée en nylon. Les ancrages des sorties sont prévues dans le moulage.

Il faut donc plusieurs couches de papier ou de carton bakélisé entre les enroulements afin de satisfaire aux conditions d'isolement. Soit, une tension d'essai normale de 2 000 V et un coefficient de sécurité de 5, il faut que l'isolement supporte 10 000 V. C'est-à-dire 10 couches de papier cristal de 0,03 mm d'épaisseur, ou 10 couches de papier kraft de 0,1 mm, ou encore 6 couches de presspahn de 0,2 mm.

Souvent dans les descriptions de transformateurs on note la présence de feuilles de papier intermédiaires alors que la d.d.p. entre couches est inférieure à 25 V.

Le papier sert alors presqu'uniquement à maintenir le fil et à assurer la rigidité mécanique du bobinage.

Un caniveau est une carcasse sans joues destinée à être utilisée sur les machines à bobiner automatiques multiples.

Un caniveau peut être moulé (bakélite, nylon, rilsan) ou en carton bakélisé collé ou non ; il se présente sous la forme d'un tube à section rectangulaire de longueur adaptée à la machine multiple employée.

4.3. — L'imprégnation des bobinages.

Il est indispensable d'imprégner les transformateurs afin de les protéger des agents extérieurs et surtout de l'humidité. Un transformateur non imprégné ne peut être fiable.

L'opération débute par un séchage prolongé afin d'éliminer l'humidité présente dans le bobinage. Il s'effectue d'abord dans une étuve à la pression

atmosphérique aux environs de 100° C. La durée dépend du volume du transformateur (8 à 20 heures). Puis, on fait le vide dans l'étuve (1 à 2 mm de Hg) pour dégazer le bobinage, pendant 1 à 2 heures. Le produit d'imprégnation est introduit dans l'étuve et prend la place des bulles d'air et des molécules d'eau emprisonnées à l'origine dans l'enroulement. Enfin, pour parachever l'imprégnation une pression de 2 à 3 atmosphères vient remplacer le vide dans l'étuve, afin de bien faire pénétrer le produit jusqu'au cœur du bobinage. Les températures et la durée des opérations dépendent des produits utilisés et du volume du transformateur.

Les différentes catégories de produits d'imprégnation sont :

— *Les vernis gras* composés de résines naturelles ou artificielles diluées dans un solvant (essence de térébenthine, essences dérivées du pétrole) et d'huiles végétales siccatives (huile de lin, huile de chanvre).

— *Les compounds* à base de brai, ou de résine. Ils se durcissent à froid sans oxydation, ni polymérisation. Ils peuvent être utilisés pour l'imprégnation à cœur et pour la simple protection au trempé.

— *Les résines synthétiques* à base de résines éthoxylines (époxy) appelées commercialement *Araldite* ou *Scotchcast*. Elles permettent soit l'imprégnation à chaud, soit l'enrobage à froid. Il existe une grande variété de ces produits adaptés aux différentes utilisations.

On mélange la résine appropriée avec un durcisseur juste avant l'emploi, il s'agit généralement de deux liquides. Une polymérisation s'effectue alors et le bobinage est imprégné et éventuellement enrobé par une résine indestructible.

— *Les vernis phénoliques et les vernis polyuréthane* à base de résines synthétiques thermo-durcissables. Ils sont dilués dans des solvants appropriés. Ils sont destinés à l'imprégnation à chaud et à cœur. Après l'évaporation du solvant, une polymérisation assure leur durcissement. Ces vernis sont de la même catégorie que celle des émaux correspondants.

— *Les vernis aux silicones*, utilisés pour l'imprégnation des enroulements effectués avec des fils émaillés devant fonctionner à haute température (résine téréphtalique : 155° C et téflon : 250° C). Ils assurent une protection efficace jusqu'à 250° C. La conduite de l'imprégnation nécessite cependant des précautions spéciales.

4.4. — La protection au trempé.

Pour la fabrication de certains transformateurs destinés au matériel grand public et dont les caractéristiques ne sont pas poussées, on procède parfois à une imprégnation au trempé.

Le bobinage est placé dans une étuve à la pression atmosphérique pour l'opération de séchage normale. Puis, il est trempé pendant quelques instants dans une cire minérale microcristalline fondue (vers 120° C). La cire, très fluide, pénètre dans le bobinage, mais pas aussi complètement que lors de l'imprégnation sous vide, puis sous pression.

En se refroidissant, la cire cristallise et obture les vides à l'intérieur du bobinage.

On peut également imprégner et enrober un transformateur au trempé au moyen des résines synthétiques prévues pour cet usage (*Araldite, Scotchcast*). La protection est ainsi meilleure.

5. — LES MACHINES A BOBINER.

Pour les transformateurs industriels et B.F., ce sont les machines à bobiner à spires jointives qui sont utilisées. Les machines à nid d'abeilles ou spéciales pour H.F. seront étudiées au chapitre VII.

On rencontre principalement : les tourets à main, les tourets automatiques pour bobinage à l'unité et les tourets automatiques multiples.

5.1. — Les tourets à main.

Avec ces appareils, le fil est maintenu et dirigé à la main. Ils sont employés pour le bobinage des enroulements comportant peu de spires en fil de fort diamètre (enroulements de chauffage). Ils comprennent :

— *Un moteur électrique* d'une puissance de 1/16 à 1/4 de cheval qui tourne à 1 500 t/mn. On y adjoint un rhéostat de démarrage commandé au pied et un compte-tour qui assure l'arrêt automatique en fin de bobinage.

— Un *support de bobine d'alimentation* fixé sous l'établi au-dessous de la broche du touret. Il reçoit les bobines de fil émaillé.

— Le *touret* proprement dit qui est fixé sur l'établi. Une poulie à trois gorges sur le moteur et sur le touret permet en déplaçant la courroie de liaison de faire tourner la broche à une vitesse maximale comprise entre 600 et 2 000 t/mn.

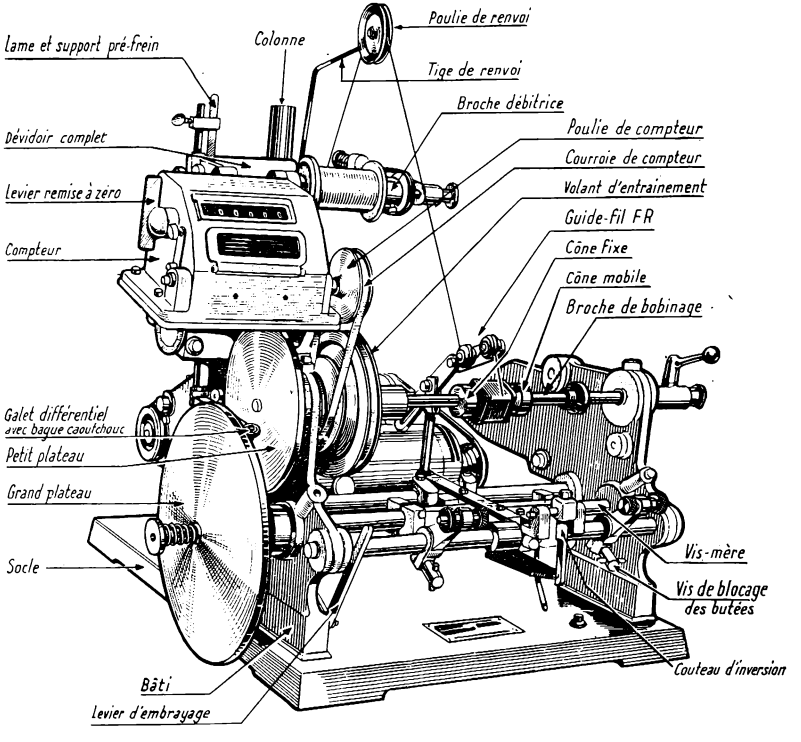


Fig. 6 - 30. — Touret automatique pour le bobinage du fil rangé à spires jointives (Laurent **F.R.**).

La broche reçoit la carcasse destinée à contenir le bobinage. Généralement dans un transformateur d'alimentation on bobine sur une machine multiple le primaire secteur et le secondaire haute tension qui comportent un grand nombre de spires et qui permettent un gain de temps appréciable. Puis, on bobine à la main le ou les deux enroulements de chauffage en gros fil.

5.2. — Les tourets automatiques.

Ils comportent les mêmes éléments que précédemment montés sur un socle métallique rigide (fig. 6 - 30).

Le moteur est relié à la broche au moyen des poulies à trois gorges et de la courroie, mais aussi au moyen d'un galet réglable entre deux disques (grand et petit plateaux) ; on obtient ainsi un réglage très progressif de la vitesse de rotation de la broche en fonction du diamètre du fil.

La bobine est montée sur un dévidoir à colonne qui comporte une poulie dont la force de rappel est réglable en fonction du diamètre du fil. Ainsi celui-ci reste bien tendu pendant le cours du bobinage sans risque de rupture.

Les tourets automatiques comprennent en plus un guide-fil commandé par une vis micrométrique à renversement de marche. Ce guide-fil permet de ranger le bobinage à spires jointives sur la carcasse entraînée par la broche. Son avance doit donc correspondre au diamètre du fil pour chaque tour. Son va-et-vient est réglé selon la largeur du bobinage. Un renversement de marche du guide-fil par micro-contacts est prévu à chaque extrémité de la course.

Le compte-tour peut être de deux modèles différents. Le compteur peut indiquer soit le nombre de spires effectuées, soit le nombre de spires restant à bobiner. Dans le premier cas le compteur part de zéro et arrête la machine à un nombre de tours prédéterminé. Dans le second cas, on affiche au départ le nombre de tours à effectuer et la machine est arrêtée à zéro.

Bien entendu la machine doit fonctionner sans à-coups et avec une grande précision.

5.3. — Les tourets automatiques multiples.

Ce sont des machines de même conception que les tourets automatiques unitaires, mais prévues pour bobiner plusieurs enroulements à la fois, en fil émaillé entre 0,05 mm et 0,8 mm.

Le nombre de bobinages que l'on peut effectuer à la fois est fonction de la largeur de l'enroulement unitaire et de la longueur entre pointes de la broche. Pour les transformateurs d'alimentation classiques on peut en bobiner jusqu'à 12 à la fois. Tandis qu'on peut effectuer jusqu'à 24 transformateurs B.F. miniatures. Le nombre des porte-bobine est double de celui des bobinages. On peut ainsi effectuer deux enroulements avec du fil de diamètre différent sans avoir besoin de remplacer les bobines. Le gain de temps est appréciable.

La machine comprend les mêmes organes que précédemment. Le moteur est plus puissant (1/4 à 1/2 cheval). Il y a autant de guide-fils que de bobinages, ils sont amovibles et réglables. Un dispositif permet d'insérer d'une façon semi-automatique la feuille de papier d'isolement entre les couches. Des couteaux séparent en fin de bobinage les différents transformateurs, en coupant entre les enroulements.

Le mode opératoire est le suivant : on place entre les pointes de la broche un caniveau de carton bakélisé unique monté sur un support métallique. On fixe l'extrémité des 12 fils, par exemple, au moyen de ruban adhésif et ce, bien à leur place. On effectue deux spires et on refixe le fil. Ces spires seront sorties au moyen d'un crochet et sont destinées à permettre d'effectuer le branchement des enroulements. Puis, on opère le bobinage à spires jointives. A la fin de la première couche une lampe s'allume au moment de l'inversion de marche, ce qui permet l'insertion de la feuille de papier d'isolement sans arrêt de la machine.

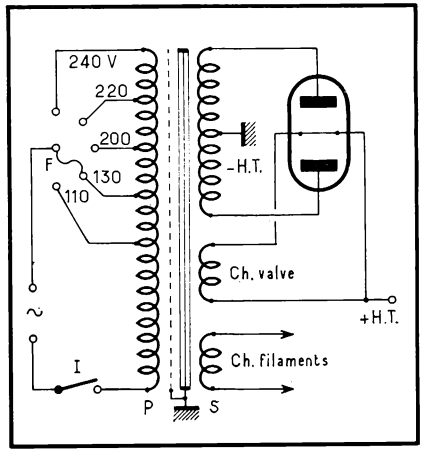


Fig. 6 - 31. — Schéma général d'un transformateur d'alimentation pour redressement des deux alternances.

Les prises intermédiaires doivent être effectuées à l'une ou à l'autre extrémité d'une couche, de façon à ce que les sorties puissent être faites selon le même processus qu'au début ou qu'à la fin du bobinage.

L'isolement entre les enroulements est assuré par le nombre voulu de couches de papier kraft. Une feuille de papier gommé est collée sur le bobinage terminé, elle permet de maintenir les enroulements très serrés.

Enfin, on coupe entre les enroulements afin d'obtenir les transformateurs unitaires et on récupère les sorties avec un crochet en regardant le bobinage par la tranche. Chaque fois qu'il y a deux bandes adhésives, il y a deux spires entre qu'il faut accrocher, sortir et torsader ensemble.

Les bobinages unitaires sont éventuellement dirigés vers les tourets à main pour la confection des enroulements en gros fil.

Ensuite, les transformateurs sont imprégnés, le circuit magnétique est posé, les sorties sont soudées sur les cosses prévues à cet effet et ils sont dirigés vers les essais et le contrôle.

Pour le bobinage des petits transformateurs, on ne se sert pas d'un caniveau en carton bakélisé, mais de carcasses moulées qui sont enfilées côte à côte sur un mandrin métallique placé entre les pointes de la broche de la machine. Il n'y a donc pas lieu ensuite d'effectuer la coupure entre les enroulements. Les sorties sont faites en passant le fil torsadé sur lui-même dans des fentes prévues dans les joues de la carcasse.

6. — LE TRANSFORMATEUR D'ALIMENTATION.

Il répond au schéma général de la figure 6 - 31.

6.1. — Le calcul du transformateur d'alimentation.

Il faut tout d'abord connaître les caractéristiques du transformateur à réaliser, ainsi que sa catégorie climatique.

Il peut être destiné au matériel grand public ou au matériel professionnel ; monté sur un appareil mobile universel ou sur un ensemble fixe.

Pour le primaire, il faut connaître : le nombre des prises et leur tension nominale, la fréquence et le mode de distribution.

En France, le secteur à 50 Hz est normalisé de la façon suivante : à Paris secteur diphasé 120 V ; en province secteur triphasé, soit 127 V entre phase et neutre et 220 V entre phases, soit 220 V entre phase et neutre et 380 V entre phases. C'est ce dernier mode de distribution qui doit être appliqué progressivement dans la France entière.

Les petits transformateurs qui font l'objet de cette étude sont tous alimentés en monophasé.

Pour l'aviation, la fréquence à bord des aéronefs est normalisée à 400 Hz sous une tension de 115 V.

Pour les appareils fixes on ne prévoit qu'une seule tension ; pour les appareils mobiles on prévoit généralement 5 prises.

Pour les secondaires, il faut déterminer : le nombre d'enroulements, leur tension nominale, la puissance en régime normal et la puissance maximale développée pour chacun d'eux. Il faut également tenir compte du nombre d'heures de fonctionnement par jour et par an ainsi que de la température ambiante maximale.

Muni de ces renseignements on calcule la puissance apparente délivrée par le secondaire, elle s'exprime en volt-ampère (VA). La puissance active $P_a = U\,I \cos \varphi$ est en watts (W) et la puissance réactive $P_r = U\,I \sin \varphi$ est en volt-ampère-réactif (var). Le cos φ est appelé facteur de puissance ; il est compris entre 0,7 et 0,8 pour les petits transformateurs grand public ; il peut atteindre 0,99 pour les transformateurs industriels de grande puissance.

Soit, par exemple, à calculer un transformateur grand public donnant aux secondaires : haute tension 300 + 300 V - 0,1 A, filament valve : 5 V - 2 A et filament tubes : 6,3 V - 5 A.

La puissance apparente au secondaire est de :

$(300 \times 0{,}1) + (5 \times 2) + (6{,}3 \times 5) = 71{,}5$ VA.

En effet, il ne faut prendre que la moitié de la tension de l'enroulement H.T., puisque les deux moitiés débitent chacune à leur tour.

En tenant compte d'un facteur de puissance de 80 %, la puissance active prise au secteur par le primaire est de 90 W.

Le calcul d'un tel transformateur consiste :

— dans le choix des tôles et de la section du circuit magnétique,

— dans le calcul du nombre de spires pour chacun des enroulements,

— dans le calcul du diamètre du fil.

— On vérifie ensuite l'échauffement et le rendement.

6.1.1. — *CALCUL DU CIRCUIT MAGNÉTIQUE.*

Puisque toute la puissance transformée prend la forme d'un flux magnétique pour passer du primaire au secondaire, la section du circuit magnétique

doit être une fonction de la puissance transmise. Il faut, d'autre part, que la surface des fenêtres soit suffisante pour y loger les bobinages. La qualité de la tôle intervient également.

Pour les tôles ordinaires (3,6 W/kg) la section est donnée par :

$$S \text{ en } cm^2 = 1{,}2 \sqrt{P} \text{ en VA (puissance apparente).}$$

Cette formule simplifiée est valable pour un secteur de 50 Hz et une induction dans le circuit magnétique de 1 tesla. Elle donne la section réelle du fer. Pour tenir compte de l'isolement des tôles et du foisonnement, il faut majorer cette section de 10 % pour obtenir la section brute ou apparente (fig. 6 - 32).

Ainsi, les pertes dues au fer et celles dues au cuivre sont du même ordre de grandeur. C'est le meilleur compromis entre le rendement et le prix de revient.

Pour les tôles à faible perte (1,1 à 1,6 W/kg), on peut utiliser la formule :

$$S = \sqrt{P}$$

Pour les circuits en C en tôle orientée, on peut aller jusqu'à $S = 0{,}9 \sqrt{P}$.

La section brute correspond à la largeur de la partie centrale de la tôle multipliée par l'épaisseur de l'empilage. On obtient le meilleur rendement et la plus grande facilité de bobinage lorsque cette section est carrée. En consul-

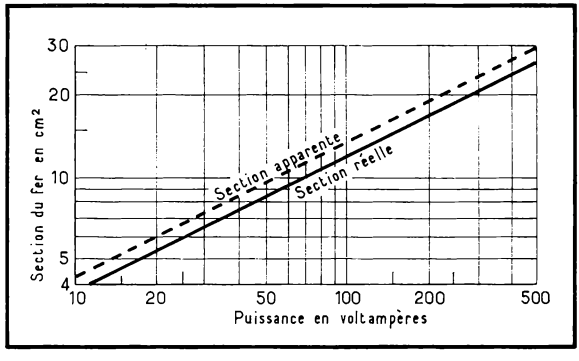


Fig. 6 - 32. — Abaque donnant la section du circuit magnétique en fonction de la puissance en VA pour des tôles ordinaires (3,6 W/kg), un secteur de 50 Hz et une induction de 1 tesla. (D'après Ch. Guilbert).

tant le catalogue des dimensions des tôles, on choisit le modèle qui semble convenir. S'il s'agit d'un petit transformateur simple on peut adopter une découpe américaine en E I. S'il y a de nombreux secondaires et une certaine puissance, il est préférable de choisir des tôles cuirassées. Pour un transformateur étanche professionnel c'est un circuit en tôle orientée en double C qui convient le mieux.

Le choix du type de tôle entraîne celui de la carcasse et du mode de protection et de fixation du transformateur.

Si l'induction est différente de 1 T, il faut en tenir compte en appliquant un coefficient correctif à la valeur de la section trouvée. Ce coefficient est donné par le rapport de l'induction choisie par 1 T. Pour un transformateur professionnel fonctionnant 24 heures par jour dans une ambiance très chaude, on choisit une induction de 0,7 T. On peut aller jusqu'à 0,9 T pour un transformateur professionnel classique aux performances moins poussées.

Un transformateur grand public pour fonctionnement intermittent est d'habitude calculé pour une induction de 1,2 T. Certains échantillons vont jusqu'à 1,4 T.

Ces valeurs sont données pour une fabrication classique utilisant du fil émaillé 120° C, une carcasse en carton bakélisé et des feuilles de papier pour

l'isolement. Elles doivent satisfaire, pour les récepteurs, aux règles de sécurité (U.T.E. C 92-110 — 1954), et pour les téléviseurs (U.T.E. C 92-210 — 1958) qui prescrivent les échauffements à ne pas dépasser.

La section du circuit magnétique des transformateurs construits avec des tôles à faibles pertes, une carcasse en rilsan, du fil émaillé au téflon, des isolants en film de téflon et une imprégnation aux silicones est beaucoup plus réduite. La température du bobinage peut atteindre 200° C.

Pour le calcul de la section du circuit magnétique des transformateurs pour l'aviation à 400 Hz, il faut tenir compte du rapport des fréquences (50/400 = 0,125) et n'employer que les circuits en tôle orientée double C de 0,1 mm d'épaisseur dont les pertes sont très réduites (2,2 W/kg à 1,5 T pour 400 Hz).

C'est cette réduction de volume et de poids du circuit magnétique à 400 Hz qui justifie l'adoption de cette fréquence par l'aviation.

6.1.2. — *CALCUL DU NOMBRE DE SPIRES.*

Le nombre de spires par volt est fonction de la densité du flux magnétique dans le circuit. Il est donné par la formule :

$$N = \frac{10^4}{4{,}44.f.B.S.}$$

N : nombre de spires par volt.
f : fréquence du secteur en hertz.
B : induction en tesla.
S : section réelle du fer en cm².

Pour 50 Hz, une induction de 1 T et une section de 10 cm², une spire donne à ses bornes 0,22 V, ou inversement il faut 4,5 spires par volt.

Le tableau ci-après donne le nombre de spires par volt pour des sections magnétiques comprises entre 4 et 30 cm² (de 5 à 500 VA) toujours pour 1 T.

S en cm²	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
Tours/V	11	7,5	5,8	4,5	3,8	3,3	2,9	2,6	2,3	2,05	1,85	1,7	1,55	1,4

Connaissant la tension nominale de chacun des enroulements il est facile de calculer leur nombre de spires. Il faut majorer les chiffres trouvés pour tenir compte de la chute de tension dans les enroulements sous l'intensité nominale. Elle est fonction de la puissance, du type de transformateur et du mode de construction. Les chiffres diffèrent sensiblement selon les sources. En moyenne il faut compter :

P (VA)	25	50	100	200	400	500	750	1000
Chute de tension %	12	10	8	6	5	4,5	4	3,5

c'est-à-dire 10 % pour les petits transformateurs et 5 % pour les gros en fabrication industrielle normale.

6.1.3. — *CALCUL DE LA SECTION DU FIL DE CUIVRE.*

Elle est proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle à la densité de courant admise.

La densité de courant est différente s'il s'agit d'un transformateur professionnel assurant un service continu ou un transformateur grand public.

Puissance (VA)	Densité de courant en A/mm² (50 Hz)	
	Grand public (1,3 T) service intermittent	Professionnel (0,8 T) service continu
Jusqu'à 50 VA	4	3,5
De 50 à 100 VA	4	3
De 100 à 200 VA	3,5	2,5
De 200 à 500 VA	3,5	2,5

Il faut maintenant vérifier si les enroulements tiennent bien dans la carcasse, c'est-à-dire dans la fenêtre des tôles. Il existe des abaques permettant de trouver la surface occupée par le fil des différents enroulements, puis il faut multiplier cette surface par 3 à 4 pour tenir compte des isolants, des sorties et du foisonnement du bobinage. Le résultat trouvé est très approximatif. Il semble préférable de réaliser le transformateur et de vérifier s'il se monte correctement et si les valeurs de tension, d'intensité et d'échauffement sont bien correctes, avant de commencer la fabrication de série. S'il s'agit de fabriquer un transformateur à l'unité, il faut effectuer le calcul avec une marge de sécurité suffisante pour éviter un échec.

C'est par des retouches successives qu'on arrive à obtenir le meilleur rendement pour le prix de revient le plus étudié.

6.1.4. — *CALCUL DES PERTES.*

Le rendement des transformateurs dépend de leur puissance, de leur mode de construction et des différents paramètres choisis (induction, densité de courant, types de tôles). C'est pourquoi les chiffres donnés sont très différents selon les sources.

Pour un transformateur industriel moyen, on obtient :

P (VA)	5	10	25	50	100	250	500	1000
Rendement %	60	70	80	85	90	91	92	92,5

On voit que le rendement est faible pour les petits transformateurs, à cause de la finesse du fil utilisé et de la densité de courant adoptée. A partir de 100 VA le rendement ne progresse que très peu.

Pour un rendement de 90 %, les pertes dans le fer et les pertes dans le cuivre sont égales, soit 5 % pour chacune des causes.

Entre 500 et 1 000 VA les pertes dans le fer sont toujours voisines de 5 %, ce sont les pertes dans le cuivre qui diminuent le plus (vers 3 %).

Connaissant le volume réel du circuit magnétique, sa densité, la qualité de tôle choisie et l'induction, on trouve les pertes dans le fer. Il est du reste plus rapide de peser le circuit magnétique que d'effectuer le calcul. Les pertes dans le fer sont :

$$Wf = K.P.B^2.f/50$$

K = pertes des tôles en W/kg à 50 Hz et 1 T.
P = poids du fer (densité environ 7,5).
B = induction en tesla.
f = fréquence en Hz.

Les pertes dans le cuivre sont dues à l'effet Joule.

$$W_c = R I^2$$

Des abaques permettent de trouver la résistance de chacun des enroulements, d'où les pertes par effet Joule. Il suffit d'additionner ces pertes pour obtenir le W_c total du transformateur.

L'échauffement du transformateur entraîne une augmentation de la résistance par rapport à celle mesurée à froid, car le coefficient de température du cuivre est positif. Si la mesure a été faite à froid, il faut majorer les pertes totales de 20 %.

6.1.5. — *CAS PARTICULIER DES TRANSFORMATEURS D'ALIMENTATION A RÉGIME VARIABLE (classe B).*

Dans tous les appareils où l'intensité anodique varie constamment, il faut s'efforcer de rendre la tension redressée la plus régulière possible. On utilise des valves à faible résistance interne et un circuit de filtre adapté. Mais il faut que la résistance de l'enroulement haute tension soit la plus faible possible.

Le calcul de l'enroulement est effectué pour la puissance maximale et non pour la puissance moyenne. On adopte une densité de courant faible (2,5 A/mm²), donc un fil de cuivre de section supérieure. La tôle utilisée est de très bonne qualité et l'induction choisie est peu élevée (0,9 T).

6.2. — La réalisation des transformateurs d'alimentation.

6.2.1. — *LES TRANSFORMATEURS PROFESSIONNELS.*

Les transformateurs d'isolement à primaire et à secondaire égaux prévus pour 50 Hz ou pour 400 Hz doivent satisfaire à la spécification C.C.T. 06-11 (1961). Il s'agit de matériel étanche et équipé de circuits orientés en double C.

Il existe une grande variété de transformateurs professionnels. Ils sont généralement montés en cuve étanche en acier soudé. Certaines cuves sont même en mumétal afin d'éviter tout rayonnement parasite. Les sorties se font au moyen de perles de verre jusqu'à 1 000 V et par des colonnettes de céramique au-dessus.

Les transformateurs sont imprégnés à cœur et la cuve est remplie par le produit d'imprégnation liquide ou solide.

Certains sont moulés dans des coquilles de plastique, d'autres sont enrobés complètement avec une résine *Araldite*.

6.2.2. — *LES TRANSFORMATEURS GRAND PUBLIC.*

Les modèles de faible puissance (30 VA) montés sur tôles en E I ou en M I sont fixés par un étrier. Les sorties aboutissent à des cosses rivées sur une plaquette de bakélite.

Les modèles normaux sont montés sur des tôles cuirassées et sont prévus pour être encastrés dans le châssis. Le capot contient généralement le répartiteur de tension secteur.

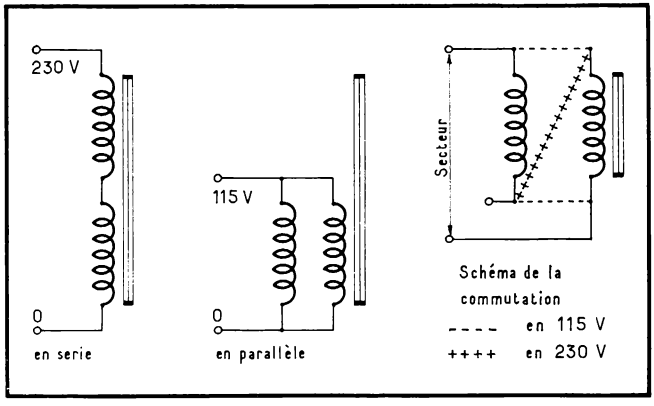


Fig. 6-33. — Transformateur d'alimentation économique à deux primaires égaux branchés en série ou en parallèle.

D'autres modèles, enfin, sont blindés avec des sorties à bornes sur une plaquette de bakélite.

Un modèle particulièrement économique possède deux primaires égaux de 115 V en fil fin. En série, ils assurent le branchement sous 230 V, la section du fil est prévue pour cette intensité. Pour 115 V les deux enroulements sont reliés en parallèle, ainsi la densité de courant reste la même. Les quatre sorties sont accessibles et c'est un distributeur spécial qui assure la commutation (fig. 6 - 33).

6.3. — Les transformateurs potentiométriques ou transformateurs variables ou alternostats.

Ce sont des autotransformateurs variables qu'il ne faut pas confondre avec un potentiomètre ; en effet, un autotransformateur ne fonctionne que sur courant alternatif, tandis que les potentiomètres sont utilisables en continu et en alternatif. Ils répondent au schéma électrique de la figure 6 - 34.

Le circuit magnétique est constitué par un ruban de mumétal ou de tôles à très faibles pertes, bobiné en spirale constituant un tore à section rectangulaire à haute perméabilité.

Le bobinage est en cuivre émaillé sur un mandrin nervuré fixé par une pièce isolante. Les spires sont bien maintenues par la nervure du mandrin et sont régulièrement espacées. On compte 3 spires par degré, soit 1 050 spires pour 350°.

Le fil est dénudé sur la partie supérieure du mandrin formant une piste circulaire.

L'axe de commande monté sur roulement à billes supporte le bras équilibré statiquement. Le curseur est un galet cylindrique en carbone. Il roule sur la piste dénudée.

Certains modèles reçoivent un curseur auxiliaire dont la rotation est limitée à 60° et qui appuie sur une deuxième piste. Il permet de faire varier la tension de sortie de ± 10 %.

Une prise est prévue sur l'enroulement à 5° du début du bobinage. Elle permet d'inverser la phase de 180° pour certaines applications de servomécanisme.

Avec cet appareil on peut faire varier la tension d'alimentation entre une tension déphasée faible et une tension supérieure à celle du secteur. En effet

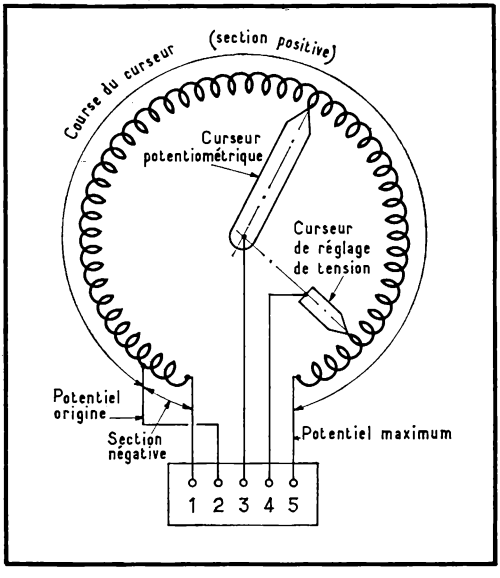


Fig. 6 - 34. — Schéma électrique d'un transformateur potentiométrique ou alternostat.

en branchant le secteur entre les bornes 2 et 4, on obtient entre 2 et 3 en début de bobinage une tension déphasée, puis une tension croissante jusqu'à la valeur du secteur lorsque le curseur principal est sur la même spire que le curseur auxiliaire, puis enfin une tension supérieure jusqu'à l'extrémité du bobinage.

Ces potentiomètres sont utilisés en laboratoire pour les essais des appareils, ainsi que dans certains circuits de servomécanismes et de calculateurs électromécaniques. Il en existe un grand nombre de modèles couvrant toute une gamme de puissance en montage simple, double ou triple.

6.4. — Les régulateurs de tension à fer saturé.

Du point de vue technologique, ce sont des transformateurs dont le circuit magnétique a été modifié. Associés à un condensateur au papier de valeur convenable, ils assurent la stabilisation de la tension d'alimentation des appareils.

Leur schéma électrique est donné par la figure 6 - 35 et les détails de construction par la figure 6 - 36.

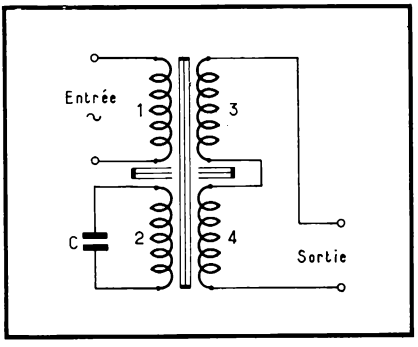
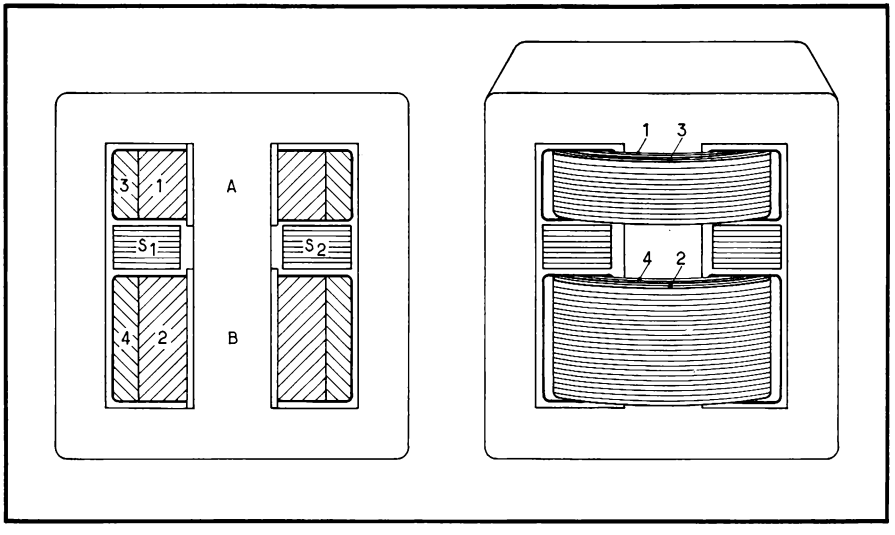


Fig. 6 - 35 (Ci-contre). — Schéma de principe du régulateur à fer saturé MCB-Véritable Alter.

Fig. 6 - 36 (Ci-dessous). — Réalisation du circuit magnétique, des shunts et des bobinages du Réguvolt MCB-Véritable Alter.



Le circuit électrique comprend trois bobinages : le primaire (1), l'enroulement intermédiaire ou résonnant (2), l'enroulement compensateur de sortie (3-4).

Le circuit magnétique est du type cuirassé ; deux shunts magnétiques S_1 et S_2 sont glissés entre les bobinages. La capacité C est branchée aux bornes de l'enroulement résonnant (2).

Lorsqu'une faible tension alternative est appliquée au primaire, le flux magnétique résultant induit une tension en particulier dans l'enroulement 2. Par suite de la réluctance des entrefers des shunts, cette tension est proportionnée au nombre de spires des enroulements 1 et 2. A mesure que la tension primaire s'élève, un flux plus important traverse la partie B du noyau. Quand l'induction devient telle que la valeur de la réactance de l'enroulement 2 approche de la valeur de la réactance de la capacité C, le circuit entre en résonance. La tension aux bornes de 2 augmente rapidement jusqu'à une valeur stable qui est plus élevée que celle déterminée par le rapport de transformation. Cette élévation de tension résulte de l'accroissement de l'induction de la partie B du circuit magnétique. Ce qui a pour effet de réduire considérable-

ment la réluctance relative des shunts. Ainsi les variations de flux produites par le primaire sont absorbées par les shunts et les variations de tension résiduelles aux bornes du circuit résonnant sont compensées par les enroulements 3 et 4.

La tension à leurs bornes est en opposition de phase avec la tension du circuit résonnant. La tension induite en eux pour une variation de la tension primaire est constamment égale à la variation apparaissant aux bornes de 4.

La tension de sortie résultante demeure constante et indépendante des variations primaires.

Une fois la résonance atteinte dans l'enroulement 2, l'équilibre entre le flux magnétique de la partie A et de la partie B du noyau est maintenu par l'effet tampon des shunts.

C'est pourquoi, lorsqu'une charge est appliquée en sortie (partie B), il en résulte le passage d'un flux utile plus important de A vers B pour compenser l'énergie consommée et maintenir l'oscillation du circuit 2. Le transformateur fournit alors une tension régulée à toute charge inférieure ou égale à sa charge nominale.

Le taux de régulation garanti est de $\pm$ 1 % pour une variation secteur de $\pm$ 15 %.

Il existe un grand nombre de modèles catalogués jusqu'à 10 kVA.

Pour certaines applications, il faut réduire le taux d'harmoniques qui peut atteindre 18 % à pleine charge. On ajoute alors sur la sortie un filtre accordé sur les harmoniques impaires du secteur. A ce moment le taux d'harmoniques est inférieur à 3 %.

7. — L'INDUCTANCE DE FILTRE.

Cette bobine à fer est constituée par un enroulement de fil émaillé sur un circuit magnétique en E I. La technologie de fabrication est la même que celle des transformateurs d'alimentation.

Une inductance de filtre associée à un ou à deux condensateurs de forte valeur constitue une cellule passe-bas offrant une très faible résistance au courant continu et une impédance élevée au courant alternatif. En effet la tension redressée par la valve n'est pas parfaitement continue ; elle est formée d'une tension continue et d'une tension alternative superposée, de fréquence 100 Hz s'il s'agit du redressement des deux alternances du secteur 50 Hz.

La présence d'un courant continu dans un enroulement placé sur un circuit magnétique provoque sa magnétisation jusqu'à la saturation. A ce moment, la perméabilité du circuit diminue dans de grandes proportions entraînant la diminution du coefficient de self-induction. Pour remédier à cet inconvénient et redonner à l'inductance la valeur nécessaire au filtrage, il faut augmenter la réluctance du circuit magnétique. Un circuit magnétique fermé bien construit a une très faible réluctance, c'est-à-dire qu'il offre une très faible résistance au flux magnétique. Pour augmenter sa réluctance, il faut prévoir un entrefer dans le circuit ; sa perméabilité initiale est fortement diminuée, mais comme la saturation est évitée, la perméabilité résultante en fonctionnement conserve une valeur qui permet d'avoir un coefficient de self-induction suffisant.

C'est pourquoi l'indication du coefficient de self-induction sans courant continu superposé, donné dans certains catalogues, n'a aucune valeur. Le seul

renseignement utile est la valeur du coefficient de self-induction avec un courant continu superposé correspondant au fonctionnement réel du filtre.

L'inductance d'une bobine avec circuit magnétique à entrefer est donnée par la formule générale suivante :

$$L = \frac{1{,}25 \cdot N^2}{\frac{l}{\mu s} + \frac{\varepsilon}{s}} \; 10^{-8}$$

L : en henrys.
N : nombre de spires.
μ : perméabilité (environ 2 500).
l : longueur de la ligne de force en cm.
s : section utile du noyau en cm^2.
ε : épaisseur de l'entrefer en cm.

Cette formule est difficile à utiliser, car on ne connaît pas la perméabilité réelle en fonctionnement. Heureusement, la valeur de L n'est pas critique.

On peut adopter la méthode simplifiée suivante.

Le choix de la section du circuit magnétique est déterminé arbitrairement par une valeur $L I^2$, produit du coefficient de self-induction par le carré du courant continu superposé. (L en henrys, I en ampères.)

$L I^2$	0,01	0,02	0,03	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Section utile du fer en cm^2 ..	3	4	5	7	8	10	12	14	16

Les circuits magnétiques choisis sont en E I (découpage américain). On a ainsi une surabondance de fer qui est fort utile afin que le champ magnétique (At/cm) ne soit pas trop élevé. De plus l'entrefer est très facile à réaliser. Les

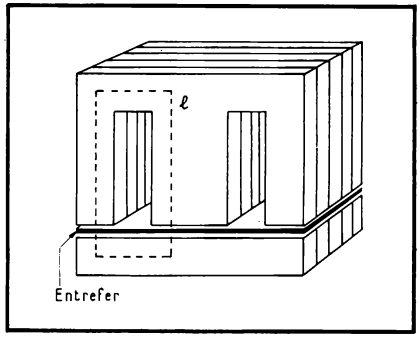


Fig. 6 - 37. — Circuit magnétique en E I avec entrefer pour inductance de filtre.

tôles sont montées du même sens et entre les E et les I on intercale une feuille de papier ou de carton bakélisé d'épaisseur convenable.

Le champ magnétique est : $At/cm = \frac{N I}{l}$

N : nombre de spires,
I : courant continu traversant la bobine en ampère,
l : longueur moyenne du circuit magnétique (fig. 6 - 37).

On choisit les tôles de façon à avoir entre 10 et 30 At/cm.

Pour déterminer la section du fil, on adopte une densité de courant faible : 2 à 2,5 A/mm² pour les bobines dont le produit $L I^2$ est inférieur à 0,2, et 1,5 à 2 A/mm² pour les bobines plus grosses. Il se peut cependant qu'une valeur de chute de tension soit imposée et conduise à prendre un fil de section encore supérieure.

Les tôles et le fil étant choisis, on bobine sur la carcasse correspondante le plus grand nombre de tours possible. Le bobinage est exécuté à spires jointives avec interposition d'une feuille de papier 0,03 mm entre chaque couche.

Connaissant le nombre de tours, on peut vérifier la valeur du champ magnétique. Il reste à déterminer l'épaisseur de l'entrefer. La courbe de la figure 6 - 38 donne cette épaisseur en fonction du champ magnétique (At/cm). La valeur indiquée est le rapport ε/l. Il suffit de multiplier le chiffre trouvé par l pour avoir la hauteur totale de l'entrefer. La feuille de papier doit avoir pour épaisseur la moitié de cette valeur, car on crée en réalité deux entrefers dans le circuit magnétique (ligne 1 de la figure 6 - 37).

Il reste à calculer la valeur du coefficient de self-induction de la bobine. La formule générale n'étant pas pratique, *M. Douriau* a établi une formule empirique dont la précision est suffisante. Elle est valable pour les circuits en tôle 1,6 W/kg, avec un rapport de champ alternatif sur champ continu de 1/10.

$$L = \frac{K\, s\, N^2}{1.10^6}$$

L, en henrys,
K, donné par la courbe de la figure 6 - 39,
s, section utile du noyau en cm²,
l, longueur moyenne du circuit en cm.

Le tableau ci-après montre un certain nombre d'exemples.

Intensité admissible en mA	Self-induction en henrys	Résistance en ohms	Section du fer en cm²	Diamètre du fil en mm	Nombre de tours	Entrefer en mm
75	10	500	4	0,15	4 300	0,1
100	6	300	4	0,16	2 900	0,2
100	7,5	400	4	0,16	3 900	0,2
125	4	100	7	0,20	1 800	0,5
125	7,5	200	10	0,20	2 200	0,5
150	9	200	10	0,25	3 000	0,5
150	18	225	15	0,25	4 300	0,5
200	5	120	10	0,30	2 200	0,5
200	10	120	15	0,30	3 200	0,5
250	5	80	15	0,40	2 500	0,5
250	12	90	30	0,40	2 000	0,5
500	5	32	25	0,60	1 800	1,0
500	10	72	25	0,60	3 800	1,0

Les bobines de filtre sont utilisées dans les circuits parcourus par un courant continu élevé. Dans les circuits à courant continu de faible intensité on préfère les filtres à résistance capacité, plus économiques.

En effet, l'efficacité du filtre est caractérisée par sa réactance Lω, car la résistance, très faible, peut être négligée.

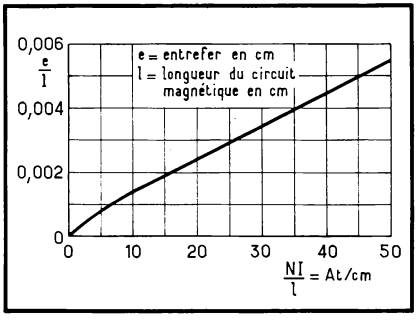


Fig. 6 - 38 (Ci-contre). — Epaisseur de l'entrefer en fonction du champ magnétique dans le circuit. (D'après Marthe Douriau.)

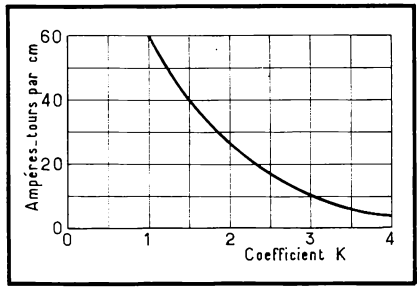


Fig. 6 - 39 (Ci-contre). — Détermination du coefficient K permettant de calculer la valeur de L en fonction du champ magnétique dans le circuit. (D'après Marthe Douriau.)

On obtient le même résultat en remplaçant la bobine par une résistance dont la valeur est égale à Lω. Mais à ce moment la chute de tension continue est beaucoup plus importante. Si l'intensité dans le circuit est faible, cette chute de tension reste acceptable. Si au contraire l'intensité est importante, elle devient inacceptable.

Les bobines de filtre pour matériel grand public sont montées avec des étriers. Les modèles professionnels sont prévus sous boîtiers ou sous cuves étanches avec sorties par perles de verre ou colonnettes de céramique. Leur fabrication est faite de la même façon que celle des transformateurs d'alimentation.

La valeur de L est donnée à ± 20 % de tolérance. Cette valeur s'entend pour I continu nominal et une tension alternative superposée maximale de 1/10 de la tension continue.

8. — LE TRANSFORMATEUR BASSE FRÉQUENCE.

8.1. — Généralités.

Alors que le transformateur d'alimentation délivre une puissance alternative de fréquence fixe, le transformateur B.F. doit couvrir une plage de fréquences très large et donner selon les cas une tension ou une puissance au secondaire avec éventuellement un courant continu superposé au primaire. C'est surtout un organe de liaison et un adaptateur d'impédances. Les paramètres à faire intervenir sont beaucoup plus nombreux et de ce fait les calculs sont plus complexes. La mise au point définitive d'un tel appareil doit être faite par tâtonnements successifs.

La représentation schématique d'un transformateur B.F. est donnée par la figure 6 - 40. Les différents paramètres ont les valeurs suivantes :

INDUCTANCE DE MARCHE A VIDE (inductance primaire).

$$L_m = \frac{4\pi}{10} N_p^2 \mu \frac{s}{l} 10^{-8}$$

L, en henrys,
N_p : nombre de tours primaire,
μ : perméabilité réelle dans les conditions de fonctionnement,
s : section nette du circuit magnétique en cm^2,
l : longueur moyenne du circuit en cm.

Cette inductance ne peut être considérée seule puisqu'elle est en parallèle avec la résistance interne du tube d'entrée.

INDUCTANCE DE DISPERSION.

$$L_p \text{ ou } L_s = 1{,}25 \cdot N^2 \frac{l}{h} \left(\frac{e_1 + e_2}{3} + e_3 \right) 10^{-8}$$

L, en henrys,
N : nombre de spires primaire ou secondaire,
l : longueur moyenne d'une spire de l'enroulement en cm,
h : hauteur du bobinage en cm,
e_1 : épaisseur de l'enroulement en cm,
e_2 : épaisseur de l'autre enroulement en cm,
e_3 : distance séparant les deux enroulements en cm.

$$L_t = L_p + K^2 L_s$$

K : rapport de transformation.

L'inductance de dispersion d'un transformateur est fonction de sa fabrication. Il faut chercher à réaliser des enroulements hauts et minces, de plus il faut réduire l'épaisseur de l'isolement entre les deux bobinages.

RÉSISTANCE DE PERTES.

$$R_c = \frac{2\pi^2 \cdot 10^{-16} \cdot f^2 \cdot N_p^2 \cdot s}{A \cdot l}$$

R_c, en ohms,
f : fréquence de la mesure en Hz,
N_p : nombre de spires primaire,
s : section nette du circuit magnétique en cm^2,

$$A = \frac{\text{pertes totales par cm}^3}{B \cdot 10^4}$$

B : en tesla,
l : longueur moyenne du circuit en cm.

CAPACITÉS PARASITES.

C_p et C_s représentent les capacités entre couches du bobinage. Cette capacité est égale à la capacité entre deux couches successives divisée par le nombre de couches. Les armatures sont constituées par le fil et le diélectrique par l'épaisseur des deux couches d'émail et du papier éventuel.

GAIN DE L'ÉTAGE.

— *Aux fréquences moyennes* (1 000 Hz), le gain est maximal :

$$G \text{ max.} = k \cdot K$$

k : coefficient d'amplification du tube,
K : rapport de transformation.

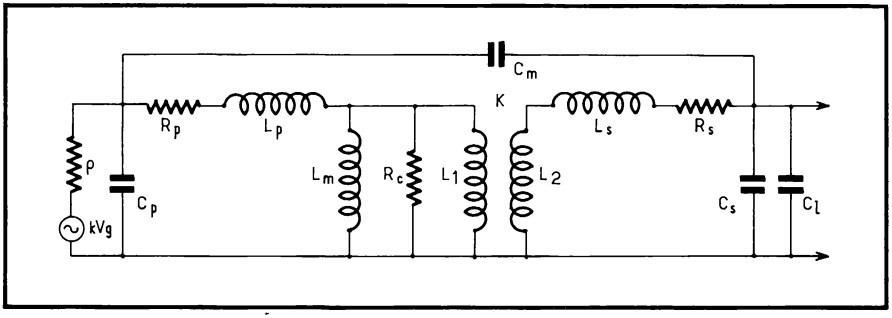


Fig. 6 - 40. — Représentation schématique d'un transformateur B.F.

kVg : tension de la source, k = coefficient d'amplification du tube.
ρ : résistance interne du tube.
R_p R_s : résistance des enroulements primaire et secondaire.
L_p L_s : inductances de dispersion primaire et secondaire, c'est le flux magnétique qui passe dans une bobine et non dans l'autre.
C_p C_s : capacité répartie des enroulements primaire et secondaire.
C_m : capacité entre enroulements.
C_l : capacité d'entrée du tube de sortie.
L_m : inductance de marche à vide (inductance primaire).
R_c : pertes dans le fer du transformateur.
L_1 L_2 : inductances fictives pour transférer le courant et la tension sur la charge et pour fournir le déphasage entre primaire et secondaire.
K : $\sqrt{L_1/L_2}$ rapport de transformation.

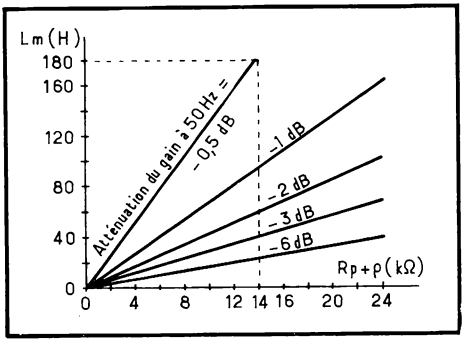


Fig. 6 - 41. — Valeur de l'inductance primaire en fonction de $R_p + \rho$ pour une certaine atténuation à 50 Hz.

— *Aux fréquences basses,* on a :

$$G \text{ basses} = \frac{G \text{ max.}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega L_m} \cdot \frac{(R_p + \rho)\, R_c}{R_c + R_p + \rho}\right)^2}}$$

R_c est grand par rapport à $R_p + \rho$, et on peut simplifier : $\frac{(R_p + \rho)\, R_c}{R_c + R_p + \rho}$ devient $R_p + \rho$.

Il faut donc une inductance primaire L_m grande devant ρ. On doit utiliser des tubes triode à faible résistance interne pour que G basses soit le plus près possible de G max. pour la plus basse fréquence à transmettre. La figure 6 - 41 donne la valeur L_m en fonction de $R_p + \rho$ pour une certaine atténuation à 50 Hz.

Le circuit précédent se simplifie et devient celui de la figure 6 - 42 qui ne comporte que les éléments à prendre en considération aux fréquences basses.

On voit que pour 180 H primaire, ce qui n'est obtenu que pour les transformateurs à très haute fidélité et une atténuation de 0,5 dB à 50 Hz, normale pour cette classe de matériel, on n'a droit qu'à 14 kΩ pour $R_P + \rho$, ce qui donne pratiquement l'obligation de choisir un tube triode ayant une résistance interne de l'ordre de 12 kΩ.

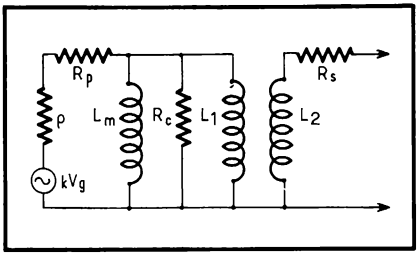


Fig. 6 - 42 (Ci-contre). — Les paramètres du transformateur intervenant aux fréquences basses.

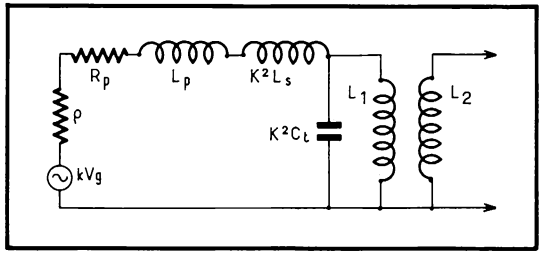


Fig. 6 - 43 (Ci-contre). — Les paramètres du transformateur intervenant aux fréquences élevées.

— *Aux fréquences élevées*, le schéma équivalent devient celui de la figure 6 - 43. Ce sont les capacités et les inductances de dispersion qui prennent toute leur importance. Pour simplifier, on convient que C_m est petit devant $C_s + C_l$. Ces éléments déterminent une résonance à une certaine fréquence qui est d'autant plus élevée que les inductances de dispersion et les capacités sont petites. Le transformateur peut alors être utilisé à des fréquences d'autant plus élevées.

Le gain à la fréquence de mesure est :

$$G \text{ fréquences élevées} = \frac{G \text{ max.}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \frac{f^2}{f_r^2} \cdot \frac{1}{Q}}}$$

$Q : \dfrac{L_t \omega}{R_e}$

$\omega : 1/\sqrt{L_t C_e}$

$C_e : \dfrac{(C_m + C_s + Cl)}{K^2}$

$R_e : (\rho + R_P + K^2 R_s)$.

$L_t : L_P + K^2 L_s$.

f/f_r : rapport entre la fréquence mesurée et la fréquence de résonance.

On voit que le coefficient de surtension à la résonance (Q) intervient. La figure 6 - 44 donne les courbes correspondantes.

ALIMENTATION.

Si un courant continu doit traverser le primaire, il faut prévoir un entrefer afin d'éviter la saturation du circuit magnétique. Cet entrefer occasionne la diminution de la perméabilité et par conséquent de L_m. Chaque fois que cela est possible on a intérêt à adopter l'alimentation parallèle du tube au lieu de

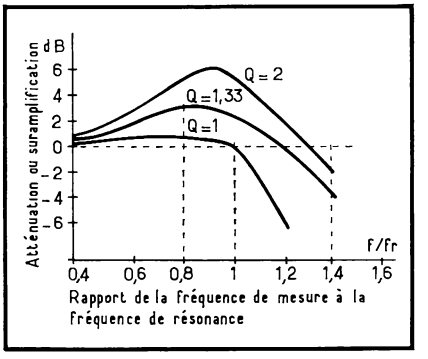


Fig. 6 - 44. — Courbes donnant l'atténuation aux fréquences élevées en fonction de la fréquence de résonance propre du transformateur.

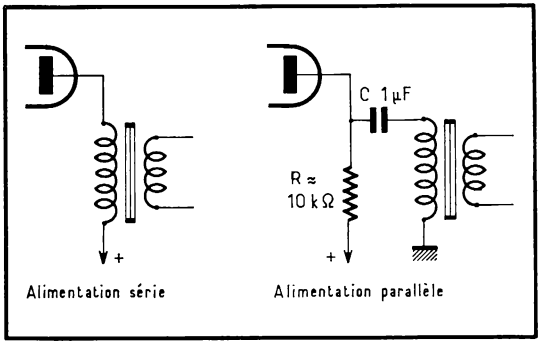


Fig. 6 - 45. — Alimentation en série et en parallèle d'un tube électronique.

l'alimentation série (fig. 6 - 45). Ainsi l'entrefer peut être supprimé, mais il faut tenir compte de la présence de R en parallèle dans le circuit, ce qui modifie les calculs. Cette alimentation ne peut se faire que si le débit anodique du tube est faible et si la chute de tension dans R est acceptable.

8.2. — Les transformateurs de tension.

Ces organes assurent le couplage et l'adaptation des impédances entre des éléments qui n'ont à transmettre que des tensions alternatives, sans puissance.

On distingue :

8.2.1. — *LES TRANSFORMATEURS D'ENTRÉE.*

Ils sont placés à l'entrée des amplificateurs, ou sur les lignes de modulation. Ils ne supportent aucun courant continu superposé. Ils assurent, par exemple, l'adaptation des impédances entre un microphone dynamique et la grille du premier étage d'un amplificateur.

Les tensions alternatives en jeu sont faibles. Le transformateur est petit, léger et étanche. Son circuit magnétique, sans entrefer, est en alliage au nickel

à très haute perméabilité. Il doit être blindé pour éviter toute induction parasite, de préférence par un boîtier en *Mumétal.* Le fil est le plus fin possible et la construction est soignée afin que les inductances de dispersion et les capacités parasites soient négligeables. Ainsi, sa bande passante est très large. Son étanchéité doit être parfaite, car l'humidité ne tarderait pas à provoquer la rupture du fil fin.

Pour établir le calcul il faut connaître : l'impédance primaire, l'impédance secondaire et la gamme des fréquences à reproduire.

8.2.2. — *LES TRANSFORMATEURS INTERMÉDIAIRES.*

Ils assurent le déphasage nécessaire au fonctionnement de l'étage symétrique, ou push-pull, de sortie. Ils permettent le couplage entre les étages préamplificateurs et les étages de puissance (fig. 6 - 46).

Dans le montage à tubes, si les grilles des étages de puissance sont toujours négatives, le transformateur ne transmet qu'une tension, c'est le cas des classes A et AB.

Dans le montage à transistors, l'étage de sortie est en classe B et le transformateur doit transmettre une puissance, ce qui modifie un peu le calcul. Il en est de même pour les amplificateurs classe B à tubes.

Pour calculer un transformateur de tension on doit connaître : l'impédance primaire, l'impédance secondaire, la valeur du courant continu primaire si on n'adopte pas l'alimentation parallèle et la gamme des fréquences à transmettre.

Pour calculer l'inductance primaire on peut utiliser la formule simplifiée suivante :

$$L_p = \frac{Z_a \cdot \rho}{6{,}28\ f \cdot (Z_a + \rho)}$$

L_p : inductance primaire en henrys,
Z_a : impédance primaire optimale en ohms,
f : fréquence limite inférieure transmise à — 3 dB par rapport au médium,
ρ : résistance interne du tube en ohms.

Le nombre de tours au primaire est :

$$N = 10^4 \sqrt{\frac{L_p \cdot l}{1{,}25 \cdot \mu \cdot s}}$$

L_p : inductance primaire en henrys,
l : longueur moyenne du circuit magnétique en cm,
s : section nette du circuit magnétique en cm^2,
μ : perméabilité du circuit sans entrefer.

Avec un entrefer, dans le cas de l'alimentation série, la perméabilité baisse d'environ 90 %. Cet entrefer se calcule comme il a été indiqué pour les inductances de filtre. Il est généralement de l'ordre de 0,1 mm.

Comme ces transformateurs ne transmettent pas de puissance, le circuit magnétique peut avoir une section nette de l'ordre de 3 cm^2. Les tôles sont en acier au silicium à très faibles pertes en E I, ou en circuits en C en tôles orientées.

Le nombre de tours du secondaire est donné par le rapport de transformation.

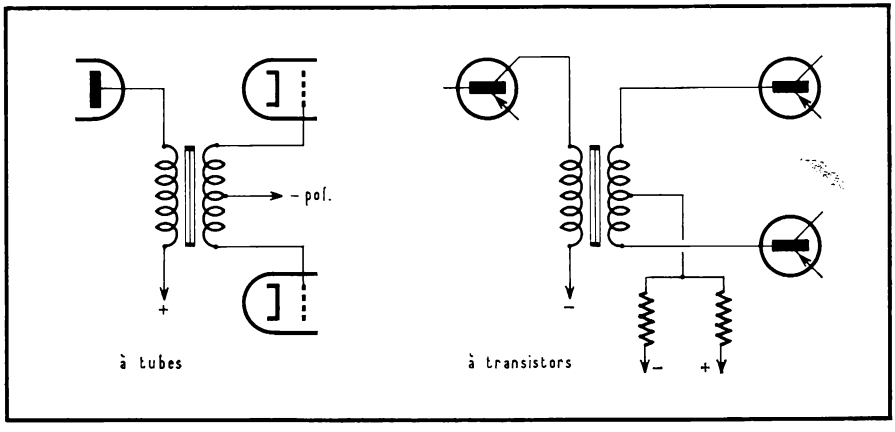


Fig. 6 - 46. — Les transformateurs intermédiaires.

Le bobinage doit être fait en prenant certaines précautions. En effet, le secondaire est double et il doit délivrer à chacune des grilles des tensions déphasées de 180° et égales pour toutes les fréquences du spectre à transmettre. Il faut donc que chaque demi-secondaire soit bien symétrique par rapport au primaire et par rapport à la masse.

De cette façon les inductances de dispersion et les capacités parasites sont égales.

Si on bobine le primaire, puis successivement les deux demi-secondaires, il n'en est pas ainsi, car le même nombre de spires donne une longueur de fil plus grande et une inductance supérieure. On ne peut réaliser ainsi que les bobinages de qualité médiocre.

Pour les appareils à haute fidélité on procède soit au bobinage en galettes (fig. 6 - 47), soit au bobinage fractionné (fig. 6 - 48).

Les galettes sont bobinées séparément et imprégnées, puis elles sont enfilées sur un caniveau dans l'ordre indiqué sur la figure. Les demi-secondaires sont

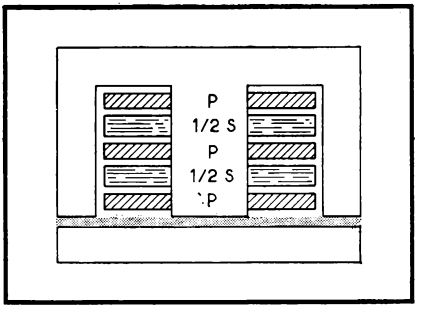


Fig. 6 - 47. — Transformateur intermédiaire à bobinage en galettes.

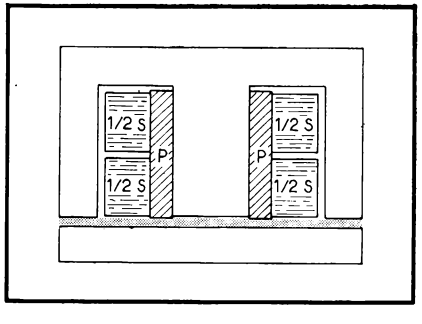


Fig. 6 - 48. — Transformateur intermédiaire à bobinage fractionné.

bien symétriques par rapport au primaire fractionné en trois et par rapport à la masse. Ce montage est très coûteux.

Le bobinage fractionné est plus simple à fabriquer. On bobine d'abord le primaire sur toute la largeur de la carcasse. Puis on bobine les deux secondaires en même temps avec une machine à deux guide-fils. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Avec ces précautions on obtient une capacité parasite totale d'environ 40 pF.

Pour les schémas à transistors, on adopte un petit circuit magnétique. C'est le 28×32 mm qui est le plus employé. L'épaisseur du circuit est de 16 mm, soit en tôle à très faibles pertes (1,1 W/kg), soit en tôles orientées, soit enfin en alliage au nickel (anhyster D). La carcasse est en rilsan moulé. Le fil est très fin entre 0,07 et 0,15 mm selon la puissance de l'amplificateur. On bobine d'abord le primaire ; on place deux couches de papier cristal de 0,03 mm, puis on bobine les deux secondaires en bifilaire (fig. 6 - 49). En effet, les tensions étant très faibles, il n'y a pas de risque de claquage d'émail et les isolements intermédiaires sont inutiles. On bobine donc les deux fils à la fois et on les branche en sens inverse, ainsi les deux demi-secondaires sont parfaitement symétriques et la capacité parasite est annulée.

Les câbliers livrent du fil émaillé double. Ce sont deux fils revêtus d'émail soudable et collés ensemble par un émail thermo-adhérent. Le bobinage est ainsi facilité et la symétrie des deux enroulements est parfaite.

La faible impédance de sortie des transistors permet la transmission d'une large plage de fréquences avec une inductance primaire de quelques henrys n'offrant aucune difficulté de réalisation.

8.3. — Les transformateurs de puissance.

Ce sont des organes qui transmettent non plus une tension, mais une puissance du primaire vers le secondaire. Leur construction et les calculs d'établissement sont modifiés de ce fait.

8.3.1. — *LES TRANSFORMATEURS INTERMÉDIAIRES POUR AMPLIFICATEURS CLASSE AB 2 OU B. (Avec courant de grille.)*

La puissance à transmettre aux grilles de l'étage symétrique est comprise entre 1/50e et 1/10e de la puissance de sortie selon les schémas. Il faut donc que la lampe d'attaque du primaire puisse fournir cette puissance. On utilise généralement une tétrode de puissance montée en triode. A ce moment l'impédance du primaire doit être égale à l'impédance de charge imposée par le constructeur du tube. L'alimentation parallèle n'est plus possible à cause du débit anodique important ; il faut donc un entrefer dans le circuit magnétique.

L'impédance et la résistance du secondaire doivent être faibles de façon à permettre au courant grille de s'écouler facilement vers la masse. Il s'agit donc de transformateurs abaisseurs. Selon les schémas les rapports de transformation sont compris entre 1/0,7 + 0,7 et 1/0,3 + 0,3.

Le calcul et la fabrication de ces transformateurs sont les mêmes que ceux appliqués aux transformateurs de sortie.

8.3.2. — *LES TRANSFORMATEURS DE SORTIE.*

Ils servent à transmettre la puissance de l'étage de sortie sur l'impédance d'utilisation qui est généralement la bobine mobile d'un haut-parleur.

Il faut tout d'abord définir le rapport de transformation qui donnera le rapport du nombre de spires entre le primaire et le secondaire.

$$K = \sqrt{\frac{Z_a}{Z_u}} = \frac{N_1}{N_2}$$

K : rapport de transformation,
Z_a : impédance de charge d'anode,
Z_u : impédance de l'utilisation,
N_1 : nombre de tours du primaire,
N_2 : nombre de tours du secondaire.

Un tel transformateur doit pouvoir transmettre la puissance modulée avec un rendement correct (0,8 environ), ne pas introduire de distorsion et transmettre toute la plage B.F.

Un transformateur n'a sa valeur d'impédance primaire que s'il est chargé au secondaire de la valeur voulue.

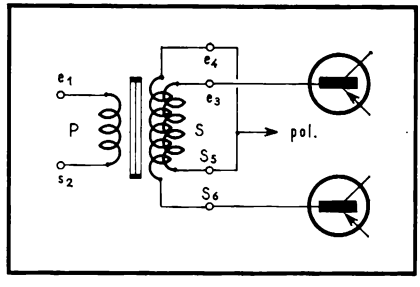


Fig. 6 - 49. — Transformateur pour transistors bobiné en bifilaire.

Si on débranche la charge, on mesure au primaire l'impédance de marche à vide. Il faut qu'elle soit importante pour un bon rendement des graves.

L'impédance de dispersion doit être très faible car elle est en série dans le circuit et absorbe une partie de la puissance transmise ; elle diminue le rendement du transformateur.

En revanche, les capacités parasites ont moins d'importance. Il vaut mieux augmenter un peu la capacité répartie si on obtient ainsi des inductances de dispersion plus faibles.

Les pertes dans le fer sont négligeables car un bon transformateur de sortie travaille à faible induction, entre 0,2 et 0,4 T.

Le rendement aux fréquences moyennes et élevées dépend des pertes dans le cuivre par effet Joule.

Le rendement aux fréquences basses est un peu moins élevé, car il faut tenir compte des pertes dans le fer qui viennent s'ajouter aux pertes dans le cuivre.

L'inductance primaire (L_p) est fonction de l'impédance de charge (Z_a), mais aussi de la résistance interne du ou des tubes de sortie (ρ), comme pour tous les transformateurs B.F.

Pour une bonne transmission des fréquences basses il faut que

$$\omega L_p > \frac{Z_a \rho}{Z_a + \rho}$$

à la fréquence de la mesure ($\omega = 2\pi f$).

Lorsque ces deux impédances sont égales, il y a une perte de transmission de $1/\sqrt{2} = 0{,}707 = 3$ dB.

Pour une bonne transmission des fréquences élevées on doit avoir : $\omega L_d < \rho + Z_a$.

L_d : inductance de dispersion.

Lorsque ces deux impédances sont égales, il y a une perte de transmission de $1/\sqrt{2} = 0{,}707 = 3$ dB.

Un transformateur de sortie peut être alimenté par un tube en classe A ou par un montage symétrique (fig. 6- 50). Pour un tube, l'alimentation anodique risque d'amener le circuit magnétique à la saturation. Il faut prévoir un entrefer. En montage symétrique, les deux courants continus parcourent l'enroulement en sens inverse et leur action s'annule, la saturation n'est pas à craindre et l'entrefer est inutile.

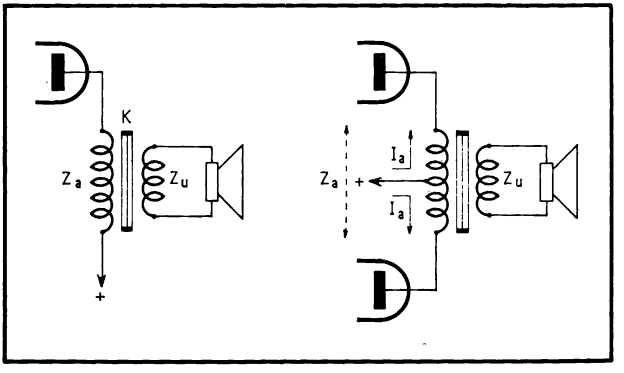


Fig. 6 - 50. — Transformateur de sortie en classe A et en montage symétrique.

Les caractéristiques du transformateur sont différentes selon que le tube de sortie est tétrode ou triode. Par exemple, on effectue la comparaison en classe A.

Tétrode : 6 A Q 5; $\rho = 50$ kΩ, $Z_a = 5$ kΩ, perte de transmission 3 dB à 30 Hz et à 12 000 Hz ;

à 30 Hz : $\omega L_p = \dfrac{Z_a \rho}{Z_a + \rho} = 4\,500\ \Omega$

$L_p = 23$ H avec un courant continu de 45 mA.

à 12 000 Hz : $\omega L_d = Z_a + \rho = 55$ kΩ

$L_d = 0{,}73$ H.

rapport $\dfrac{L_d}{L_p} = \dfrac{0{,}73}{23} = 3\ \%$.

Triode : 6 A 3; $\rho = 800\ \Omega$, $Z_a = 2\,500\ \Omega$.

à 30 Hz : $\omega L_p = 600\ \Omega$

$L_p = 3{,}22$ H.

à 12 000 Hz : $\omega L_d = 3\,300\ \Omega$

$L_d = 0{,}05$ H.

rapport $\dfrac{L_d}{L_p} = \dfrac{0{,}05}{3{,}22} = 1{,}5\ \%$.

En conclusion, le transformateur pour tétrode est plus lourd, car L_p est élevé, mais il est facile à faire car L_d autorisé est important. Le transformateur pour triode est léger, mais doit être très soigné pour obtenir la valeur demandée pour L_d (0,05 H).

8.3.3. — *CALCUL PRATIQUE DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE.*

Section du fer : La section nette est $s = 2\sqrt{P}$. Foisonnement : 10 %.
P : puissance B.F. maximale.

Calcul du nombre de tours au primaire :

$$N_1 = A\,E/s$$

N_1 : nombre de tours au primaire,
E : valeur de la tension anodique appliquée au tube (V),
s : section nette du fer en cm^2,
A : coefficient empirique = 40 à 50 (lorsqu'il n'y a pas de courant continu dans l'enroulement) et 80 à 100 (s'il y a du courant continu et un entrefer).

Dans le cas d'un étage symétrique, la formule donne le nombre de tours d'un demi-secondaire, il faut le multiplier par deux pour avoir le nombre de tours total.

Calcul du rapport de transformation.

$$K = \sqrt{\frac{Z_a}{Z_u}} = \frac{N_1}{N_2}$$

le nombre de tours au secondaire est :

$$N_2 = \frac{N_1}{\sqrt{Z_a/Z_u}}$$

Dans le cas d'un étage symétrique on prend pour N_1 le nombre total de spires.

Afin de tenir compte des pertes il faut majorer N_2 de 10 % pour les faibles puissances et de 5 % au-dessus de 40 W.

Choix du diamètre des fils.

On choisit une densité de 2,5 A par mm^2 afin d'obtenir un bon rendement.

Au primaire l'intensité totale comprend l'intensité anodique du tube, plus l'intensité B.F.

$$I_{BF} = \sqrt{W/Z_a}$$

l'intensité résultante :

$$I_{totale} = \sqrt{I_0^2 + I_{BF}^2}$$

En première approximation, on peut majorer I_a de 50 % pour obtenir I_{totale}.

Au secondaire, il n'y a pas de courant continu et :

$$I = \sqrt{W/Z_u}$$

Choix du circuit magnétique.

Les tôles au nickel ne peuvent pas être utilisées car leur saturation serait inévitable. On adopte, soit les tôles au silicium à faibles pertes (1,6 W/kg), soit les circuits en C en tôles orientées.

Les tôles au silicium sont découpées en E I ou en M I selon le volume des bobinages et des isolants, la découpe américaine donne parfois une surface de fenêtre insuffisante.

Les bobinages doivent être très serrés, les isolants sont minces et de très bonne qualité afin de réduire le plus possible le volume de l'enroulement.

L'entrefer est d'environ 0,1 mm.

Réalisation des bobinages.

Le secondaire doit être placé symétriquement aux deux demi-primaires. Le bobinage est fractionné, il est très complexe dans les transformateurs à haute fidélité.

Le fil est émaillé. Pour les montages à transistors on utilise le fil bifilaire thermo-soudable.

Les carcasses sont généralement moulées avec des joues latérales et parfois un cloisonnement central.

8.3.4. — *EXEMPLES DE RÉALISATION DE TRANSFORMATEURS DE SORTIE.*

— TRANSFORMATEUR SIMPLE POUR UN TUBE ECL 82.

Primaire : $Z_a = 5\,600\ \Omega$; P = 2 W.

3 024 spires en 21 couches de 144 spires, fil 0,13 mm ; entre couches 1 feuille papier kraft 0,05 mm.

Secondaire : $Z_u = 5\ \Omega$ — 100 spires, fil 0,7 mm ; entre couches 2 feuilles papier kraft 0,08 mm.

Circuit magnétique : tôle 2,6 W/kg E I 60 × 50 mm ; épaisseur 25 mm ; entrefer : 0,06 mm papier kraft ; fixation par étrier.

— TRANSFORMATEUR ULTRA-LINÉAIRE SYMÉTRIQUE, 10 W.

Il répond au schéma de la figure 6 - 51. Les écrans des tubes de puissance sont branchés sur une prise du bobinage entre 35 et 43 % de l'enroulement. Il se produit une contre-réaction qui permet d'obtenir une courbe de réponse linéaire sur une plage importante.

Le transformateur pris en exemple a été étudié pour un étage symétrique de deux ECL 82 donnant 7 W. Le calcul a été fait pour 10 W afin d'avoir un excellent rendement. Le mandrin est en carton bakélisé. Le bobinage commence en A, c'est la fraction du bobinage qui comporte la prise écran ultra-linéaire.

Puis, on place deux couches de papier kraft et on bobine une fraction du secondaire B. On bobine ensuite une fraction du primaire C et ainsi de suite jusqu'à la dernière fraction du primaire G.

On obtient, ainsi, un transformateur dont l'inductance primaire est élevée, dont l'inductance de dispersion et la capacité répartie sont faibles et dont la symétrie est bonne. Les couches sont régulières, comportent le même nombre de spires selon les enroulements et sont bobinées dans le même sens.

Enroulements primaires.

A : début de bobinage en 1, bobiner 2 couches, effectuer la prise d'écran G1, puis bobiner 2 couches et sortir en 2 ;

C : 5 couches (3-4) ;

E : 5 couches (5-6) ;

G : 2 couches, prise d'écran G2, 2 couches (7-8).

Chaque couche comporte 184 spires de fil cuivre-émaillé de 14/100e mm, soit un total de 18 × 184 = 3 312 spires ; entre chaque couche on place une feuille de papier kraft de 5/100e mm.

La prise 1 est réunie à l'anode du premier tube, G1 à l'écran du même tube. La prise 8 est branchée sur l'anode du second tube et G2 à l'écran du même tube. La haute tension est reliée aux prises 3 et 6. Il faut réunir les prises 2 et 5, 4 et 7, 3 et 6.

Enroulements secondaires.

B et F : chacun 1 couche.
D : 2 couches.

Chaque couche comporte 45 spires en fil cuivre-émaillé de 65/100e mm, soit au total de 4 × 45 = 180 spires.

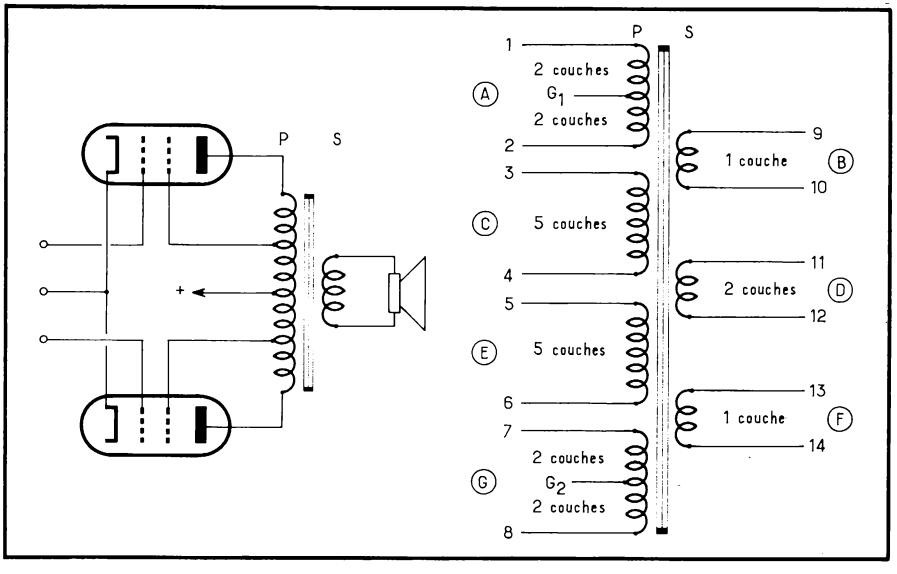


Fig. 6 - 51. — Transformateur en montage ultra-linéaire de 10 W.

Entre les enroulements primaire et secondaire et entre les couches du secondaire, on place deux couches de papier kraft de 8/100e mm.

Le haut-parleur de 15 Ω est branché entre 9 et 14. Il faut réunir les sorties 10 et 11, 12 et 13.

Circuit magnétique.

Tôles à grains orientés à très faibles pertes, circuit 75 × 62,5 mm EI, épaisseur du circuit 45 mm, tôlage imbriqué 1 × 1 (c'est-à-dire, une tôle dans un sens, la suivante dans le sens inverse et ainsi de suite).

Le bobinage des transformateurs à haute fidélité est encore plus complexe.

— TRANSFORMATEUR DE SORTIE POUR TRANSISTORS.

Il est bobiné en bifilaire comme pour le transformateur déphaseur (fig. 6 - 52).

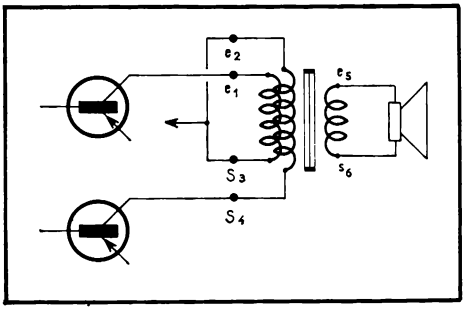


Fig. 6 - 52. — Transformateur de sortie pour transistors.

Primaire : $Z_a = 23\ \Omega$ par demi-primaire ; $P = 1$ W.

144 × 2 spires, fil 0,28 mm bobinage bifilaire.

Isolement entre primaire et secondaire : 3 couches papier kraft 0,05 mm.

Secondaire : $Z_u = 5\ \Omega$; 72 spires, fil 0,55 mm.

Circuit magnétique : tôles 1,6 W/kg, imbriquées 3 par 3 sans entrefer; circuit EI 28 × 32 mm, épaisseur 13 mm ; fixation par étrier.

8.4. — Les différents transformateurs B.F. catalogués.

8.4.1. — *LES MODÈLES ORDINAIRES.*

Ils sont montés sur étrier, sérieusement imprégnés.

Les petits modèles couvrent la plage 150 à 5 000 Hz ± 1 dB.

Les modèles soignés couvrent de 75 à 7 000 Hz ± 1 dB.

8.4.2. — *LES MODÈLES PROFESSIONNELS OU A HAUTE FIDÉLITÉ.*

Ils sont présentés dans des cuves étanches, sorties par perles de verre ou par colonnettes de céramique.

Les cuves sont parfois constituées par deux ou trois blindages dont un en mumétal et les autres en acier pour une protection totale contre les inductions parasites.

Ils couvrent la plage 30 à 15 000 Hz ± 0,5 dB.

LES BOBINAGES POUR CIRCUITS A HAUTE FRÉQUENCE

1. — GÉNÉRALITÉS.

« Les bobinages pour circuits à haute fréquence » est un titre de chapitre qui couvre une très grande variété de bobinages très différents.

On doit tout d'abord distinguer les bobinages destinés aux applications « grand public », de ceux prévus pour le matériel professionnel.

Les bobinages grand public équipent les récepteurs à tubes ou à transistors pour les gammes modulées en amplitude (A.M.) et les gammes modulées en fréquence (F.M.). Par ailleurs, rentrent dans la même catégorie les bobinages pour récepteurs de télévision en bandes I et III pour le premier programme, et en bandes IV et V pour le second programme.

Les bobinages professionnels couvrent une grande variété d'applications depuis les récepteurs professionnels, les émetteurs de toutes puissances et pour toutes les gammes de fréquences, jusqu'aux filtres pour des courants porteurs ou pour des mémoires électroniques.

Il ne sera donné dans ce chapitre que les compléments aux bobinages B.F. nécessaires, car les principes de l'électromagnétisme s'appliquent à toutes les fréquences.

2. — LE FIL.

Les principales causes de pertes dans le fil sont les suivantes :

— *Les pertes par effet Joule* occasionnées par la résistance du fil et par l'intensité du courant qui le parcourt.

— *Les pertes par courants de Foucault* se produisent dans la masse du fil. Elles dépendent de sa section et de la fréquence du courant.

— *Les pertes diélectriques* sont fonction de la nature et de la qualité de l'isolant du fil et du support du bobinage.

— *Les pertes par absorption* se produisent dans les masses métalliques voisines.

— *Les pertes par radiation* proviennent du rayonnement du fil dans le milieu ambiant. Ces pertes ne sont appréciables que pour les bobinages de puissance.

— *Les pertes par « effet pelliculaire »* ou « skin effect ». Ce sont les plus importantes en H.F. On remarque que la densité de courant est plus forte à la surface du fil qu'en son centre. Il s'échauffe plus que ne le voudrait la loi de Joule (RI^2). On dit que la résistance du fil en H.F. est plus grande que sa résistance en continu.

Le rapport de R_{HF} sur $R_{continu}$ est donné dans le tableau ci-après en fonction de x.

$$x = \pi d \sqrt{2 \mu f / \rho}$$

f : fréquence en kHz;
d : diamètre du fil en cm ;
ρ : résistivité : 1,73 pour le cuivre ;
μ : perméabilité : 1 pour le cuivre.

x	$R_{HF}/R =$	x	$R_{HF}/R =$	x	$R_{HF}/R =$	x	$R_{HF}/R =$
0	1,0000	3,4	1,456	10,5	3,975	24	8,741
0,5	1,0003	3,8	1,603	11	4,151	26	9,447
0,6	1,0007	4,0	1,678	11,5	4,327	28	10,15
0,7	1,0012	4,2	1,752	12	4,504	30	10,86
0,8	1,0021	4,6	1,899	12,5	4,680	32	11,57
0,9	1,0034	5,0	2,043	13	4,856	34	12,27
1,0	1,005	5,6	2,254	13,5	5,033	36	12,98
1,2	1,011	6,0	2,394	14	5,209	38	13,69
1,4	1,02	6,4	2,533	14,5	5,386	40	14,40
1,6	1,033	7,0	2,743	15	5,562	42	15,10
1,8	1,052	7,6	2,954	16	5,915	44	15,81
2,0	1,078	8,0	3,094	17	6,268	46	16,52
2,2	1,111	8,4	3,235	18	6,621	48	17,22
2,4	1,152	9,0	3,446	19	6,974	50	17,93
2,6	1,201	9,4	3,587	20	7,328	60	21,47
2,8	1,256	9,6	3,658	21	7,681	70	25
3,0	1,318	10	3,799	22	8,034	80	28,54
						100	35,61

— *Les pertes dues à la capacité répartie de la bobine* ne sont appréciables qu'aux fréquences supérieures à 3 MHz. Cette capacité vient s'ajouter à la capacité de départ du circuit et diminue légèrement la gamme couverte. On la réduit en bobinant à spires espacées et en aérant le bobinage.

Ces causes de pertes déterminent la nature du fil à utiliser dans les différents circuits.

Pour avoir des pertes minimales il faut :
— adopter une densité de courant faible,
— ne pas avoir une masse de métal trop importante,
— utiliser un très bon isolant, ou du fil nu et un très bon support du point de vue H.F.,
— obtenir une résistance H.F. la plus faible possible,
— maintenir une faible capacité répartie.

Le fil de cuivre électrolytique pur *argenté* en surface de 0,8 mm de diamètre environ, bobiné à spires espacées de 0,8 mm procure les pertes minimales pour les fréquences supérieures à 5 MHz. En effet, l'argent superficiel est le métal ayant la plus faible résistivité donc donnant la plus faible R_{HF}.

Lorsque la puissance du circuit augmente on a intérêt à employer du *tube argenté*, car on diminue ainsi la masse du métal sans augmenter la résistance H.F. de la bobine puisque le centre n'est pas parcouru par le courant.

Les bobinages pour les fréquences moyennes (comprises entre 100 kHz et 2 MHz) ne peuvent être bobinés à spires espacées car leur volume serait trop important. Il faut donc isoler le fil. On choisit, soit l'*émail*, soit la *soie*, la *rayonne* ou le *nylon*. Certains conducteurs sont isolés par une couche d'émail et par une couche de soie, de rayonne ou de nylon.

Lorsque l'enroulement comporte peu de spires on peut effectuer le bobinage à spires jointives. Lorsque le nombre de spires est important on préfère le bobinage en nid d'abeilles. Cette méthode réduit la capacité répartie en aérant la bobine.

Pour réduire la masse de métal, on utilise aux fréquences moyennes du *fil divisé*. C'est un câble composé d'un certain nombre de brins de fil de cuivre isolés à l'émail. Tous les brins sont cordés ensemble de façon que chacun d'eux occupe toutes les positions dans le câble. Ainsi, chaque brin coupe le même nombre de lignes de force et est parcouru par le même courant. Le câble est recouvert d'une gaine de soie grège. Dans certaines fabrications nouvelles le câble est isolé lui-même à l'émail (Divirex). On choisit de l'émail thermo-soudable pour cet usage de façon à faciliter le décapage et la soudure des extrémités de la bobine. Il suffit de tremper le câble dans de la soudure fondue.

La manipulation de ce câble doit être faite avec précaution, car la rupture d'un brin entraîne une augmentation appréciable des pertes.

Le fil élémentaire de 0,05 mm est le plus courant, on rencontre également des fils de 0,03, 0,06 et 0,07 mm.

Pour le matériel grand public, les câbles les plus courants contiennent de 5 à 30 brins de 0,05 mm, ou encore 10 brins 0,06 ou 10 brins 0,07.

Pour le matériel professionnel, il existe des câbles comportant un plus grand nombre de brins, jusqu'à 400 brins de 0,03 mm. Ils permettent d'obtenir des coefficients de surtension remarquables.

Le fil divisé donne des pertes totales inférieures à celles du fil plein jusqu'à une fréquence limite donnée par la formule :

$$f = \frac{0{,}255}{d^2\,\beta^3\,\sqrt{N}}$$

f : fréquence limite en kHz,
d : diamètre d'un brin en cm,
N : nombre de brins,

$\beta = \dfrac{d\sqrt{N}}{p}$ p : pas de l'enroulement en cm.

Pour les câbles grand public, la fréquence limite se situe vers 1,5 MHz. C'est pourquoi le fil divisé est utilisé pour la confection des bobinages P.O. et F.I.

3. — LES SUPPORTS.

3.1. — Les supports non magnétiques.

L'*air* est le meilleur des supports. C'est-à-dire que le fil est bobiné sans aucun support matériel. Il doit avoir un diamètre suffisant pour être assez rigide et pour ne pas se déformer ou se déplacer. Il existe de telles bobines en fil argenté pour les fréquences très élevées. Parfois, le fil est maintenu en place par une ou plusieurs barrettes de stéatite ou de quartz.

Les principaux supports minéraux naturels ou artificiels sont le *quartz*, le *verre* et les *céramiques*. Ils résistent bien aux essais climatiques et ils peuvent être utilisés aussi bien pour le matériel professionnel que pour le matériel grand public car leurs pertes sont très faibles.

Les supports synthétiques sont les plus employés. Pour le matériel professionnel les supports en *Téflon* sont remarquables mais coûteux. Pour le matériel grand public les supports en *nylon*, *rilsan* ou *polystyrène*, donnent de très bons résultats. Les supports en *bakélite moulée* sont très utilisés pour le matériel courant. Enfin, les supports en *carton bakélisé* sont presque abandonnés car ils sont hygroscopiques.

Ce sont surtout les conditions d'utilisation du matériel qui imposent le choix du support. En effet, si on exclut les conditions climatiques on constate que le coefficient de surtension d'une même bobine réalisée sur ces différents supports est du même ordre de grandeur.

La valeur de la self-induction d'un bobinage cylindrique à une couche est donnée par la formule de *Nagaoka*

$$L = k\, n^2\, d\, 10^{-3}$$

L : µH,
n : nombre de spires,
d : diamètre moyen de la bobine en cm,
k : coefficient fonction du rapport d/l,
l : longueur du bobinage en cm,

$$k = \frac{100\, d}{4\, d + 11\, l} \text{ (valeur approchée).}$$

En simplifiant, on a :

$$L = \frac{d^2\, n^2}{40\, d + 110\, l}$$

On obtient le coefficient de surtension maximal lorsque

$$d/l = 2{,}5$$

car à ce moment la longueur de fil est minimale pour un coefficient de self-induction donné. Ce rapport est difficilement applicable dans la pratique.

Pour une bobine à plusieurs couches, que ce soit en nid d'abeilles ou en vrac, on adopte la formule :

$$L = \frac{0{,}08\, d^2\, n^2}{3\, d + 9\, l + 10\, e}$$

L : μH,
n : nombre de spires,
d : diamètre moyen en centimètres,
l : largeur de la bobine en centimètres,
e : épaisseur de la bobine en centimètres.

Les rapports optimaux à donner à un bobinage en nid d'abeilles sont :

$$l = e$$
$$d/l = 3$$

Le bobinage est carré, il est aussi haut que large. Il est facile à bobiner et son coefficient de surtension est optimal. A ce moment la formule se simplifie :

$$L = \frac{n^2 d}{100}$$

Toutes ces formules sont empiriques.

Afin de ne pas amortir les bobinages à air, il faut éviter de placer leur blindage trop près de l'enroulement. Un grand blindage bien étudié n'introduit que 5 % de pertes supplémentaires.

Les blindages réduits utilisés parfois dans les récepteurs peuvent provoquer une diminution du coefficient de surtension compris entre 15 et 25 %.

3.2. — Les supports magnétiques métalliques.

3.2.1. — *FABRICATION.*

Pour augmenter la perméabilité du noyau on peut avoir recours à un circuit magnétique en fer. Mais, les pertes par courants de Foucault dans la masse du métal deviennent prohibitives en H.F. Pour les réduire, il faut utiliser de la poudre de fer dont chacun des grains est isolé par une matière plastique. La perméabilité est très réduite par rapport au fer massif, mais les pertes sont acceptables. Cette perméabilité du support permet de réduire le nombre de spires dans la même proportion et donc de réduire les pertes dans le fil. En définitive le coefficient de surtension global est plus élevé. Deux bobines de même valeur, l'une à air, l'autre en pot fermé présentent les différences suivantes : gain en volume de la bobine à fer par rapport à la bobine à air : 80 % ; gain en poids : 33 % ; économie de fil en longueur : 60 % ; augmentation du coefficient de surtension : 170 % ; diminution des pertes totales : 61 %. Ce chiffre est obtenu malgré les pertes dans le noyau magnétique qui n'existaient pas auparavant (pertes par courants de Foucault, par hystérésis et par relaxation magnétique).

Pour obtenir les pertes minimales il faut que les grains de fer soient approximativement sphériques, afin d'éviter l'effet de pointe. Il faut aussi que leur diamètre soit proportionné avec la fréquence d'utilisation du circuit.

Pour cela on chauffe du minerai de fer dans une atmosphère d'oxyde de carbone. La réaction donne du fer *pentacarbonyle* $Fe(CO)_5$. En le chauffant, il se décompose ; l'oxyde de carbone est libéré et le fer pur se dépose.

Cette réaction assure la purification du minerai de fer et donne des particules très fines et approximativement sphériques.

La poudre de fer est ensuite triée. On sépare les particules des différents diamètres de 1 à 50 μ pour fabriquer des noyaux destinés aux différentes fréquences.

Toutes ces opérations sont faites à l'abri de l'air sous atmosphère inerte.

A partir des différentes poudres on fabrique la pâte magnétique qui doit constituer le noyau. Pour cela on dissout différents plastiques de la famille des bakélites dans des solvants appropriés. On mélange longuement, on ajoute un lubrifiant afin de faciliter le moulage ou l'extrusion. La pâte définitive est moulée selon la forme du support. Les grains de fer sont enrobés dans un isolant, la résistance transversale est de 10 MΩ au cm^3. Le noyau est enfin polymérisé à chaud afin de stabiliser ses caractéristiques.

3.2.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

A titre d'exemple, le tableau ci-après donne les caractéristiques des différents noyaux fabriqués avec les poudres *Oréga.* Il y est indiqué si la matière doit être pressée ou injectée. La lubrification de la pâte à injecter doit être plus poussée, mais sa tenue à la température est moins bonne. Les colonnes suivantes se rapportent aux principales caractéristiques.

— μ *est la perméabilité torique* qui est constante pour chaque qualité de poudre. Pour les différents supports on calcule leur perméabilité effective qui dépend de leur forme et de leurs dimensions. La perméabilité torique est la plus élevée et constitue une valeur maximale pour chaque catégorie de poudre.

— F *est le coefficient de pertes par courants de Foucault :*

$$R_F = F\ L \left(\frac{f}{800}\right)^2$$

R_F : pertes par courants de Foucault totales,
F : coefficient de pertes par courants de Foucault,
L : coefficient de self-induction de la bobine en henrys,
f : fréquence d'utilisation.

— h *est le coefficient de pertes par hystérésis :*

$$R_h = h\ L \frac{Ni}{l} \left(\frac{f}{800}\right)$$

R_h : pertes par hystérésis totales,
h : coefficient de pertes par hystérésis,
L : coefficient de self-induction de la bobine en henrys,
Ni/l : ampères-tour par unité de longueur du circuit magnétique,
f : fréquence d'utilisation.

— t : *coefficient de pertes par traînage :*

$$R_t = t\ L \left(\frac{f}{800}\right)$$

R_t : pertes par traînage totales,
t : coefficient de pertes par traînage,
L : coefficient de self-induction en henrys,
f : fréquence d'utilisation.

— *Le coefficient thermique de perméabilité par degré centigrade* est donné par :

$$\left(10^4 \frac{\Delta\mu}{\mu}\right) \theta$$

$\Delta\mu$: variation de perméabilité,
θ : variation de température.

REMARQUES. — En règle générale, plus la perméabilité torique est élevée, plus les pertes sont élevées pour une même fréquence. Il existe donc pour chacun des cas une perméabilité optimale au-delà de laquelle on ne peut plus obtenir le coefficient de surtension désiré.

Le courant continu superposé a ici un effet négligeable, tant sur la perméabilité que sur le coefficient de surtension. Il n'y a donc pas d'entrefer à prévoir.

Référence	Utilisation	Matériau pressé ou injecté	$\mu \pm 10\ \%$	Domaine de fréquence approxim (kHz)	$10^2 F$ (Ω/H)	h (Ω/H/AT)	t (Ω/H)	$\frac{h}{\sqrt{\mu}}$	$\left(10^4 \frac{\Delta\mu}{\mu}\right)\theta$	Densité moyenne
P 229	Tores HF - Pots HF Pots coupés Poulies - Bâtonnets	pr.	13	$\leqslant$ 3 000	< 3	< 3	0,9	$< 0{,}83$	$\sim - 1$	5,2
P 255	Vis - Pots HF	inj.	13	$\leqslant$ 3 000	< 3	< 3	0,9	$< 0{,}3$	$\sim - 1$	5
P 317	Pots BF - Bâton.	pr.	30	$<$ 200					< 4	7
P 325	Tores - Pots Bâtonnets HF	pr.	13	$>$ 3 000	< 1	< 2	$< 0{,}7$	$< 0{,}55$	$\sim - 1$	5,2
P 327	Vis HF	inj.	13	$>$ 3 000	< 1	< 2	$< 0{,}7$	$< 0{,}55$	$\sim - 1$	5,2
P 328	Tores BF	pr.	55	$<$ 50	< 10	< 50	< 9	$< 6{,}7$	< 4	7,3
P 361	Tores - Pots - Bât.	pr.	13	$>$ 5 000	< 1	$< 1{,}5$	$< 0{,}7$	$< 0{,}42$	$\sim - 1$	5,2
P 362	Vis - Pots	inj.	13	$>$ 5 000	< 1	$< 1{,}5$	$< 0{,}7$	$< 0{,}42$	$\sim - 1$	5,2
P 363	Tores - Bât. - VHF	pr.	13	$>$ 25 000	$< 0{,}8$	< 1	$< 0{,}7$	$< 0{,}28$	$\sim - 1$	5,2
P 364	Vis - Pots	inj.	13	$>$ 25 000	$< 0{,}8$	< 1	$< 0{,}7$	$< 0{,}28$	$\sim - 1$	5,2
P 398	Bâtonnets	pr.	13	$>$ 3 000						
P 399	Vis	inj.	13	$<$ 3 000						
P 413	Tores - Pots - V. rect.	pr.	13	$\leqslant$ 3 000						
P 440	Bâtonnets		13	$>$ 3 000	< 1	< 2	$< 0{,}7$	$< 0{,}55$	$\sim - 1$	5,2
P 447	Bâtonnets - Tiges	pr.	13	$>$ 5 000	< 1	$< 1{,}5$	$< 0{,}7$	$< 0{,}42$	$\sim - 1$	5,2

3.2.3. — *DIFFÉRENTS MODÈLES.*

3.2.3.1. — LES BATONNETS.

Ils peuvent être réglables ou non.

Les *bâtonnets non réglables* sont les plus simples. Les lignes de force magnétiques se referment partiellement à travers le fer et partiellement dans l'air. Par suite de cet entrefer infini et d'une grande dispersion de flux, il est difficile de déterminer la valeur exacte de la perméabilité, d'où le nombre de spires nécessaire pour une valeur de self-induction. On les emploie rarement dans les circuits accordés qui nécessitent une précision supérieure. On les réserve plutôt pour les bobines d'arrêt dont la valeur n'est pas critique. A ce moment on noie les fils de sortie dans le bâtonnet qui peut être soudé dans le circuit comme une résistance. De plus, la bobine peut être imprégnée et parfaitement protégée.

Selon les poudres choisies, les bâtonnets peuvent être utilisés respectivement jusqu'à 0,2 MHz et 25 MHz. A ce moment le coefficient de self-induction maximal est compris entre 1 mH et 100 μH (fig. 7 - 1).

Les *bâtonnets réglables* comportent une vis en fer H.F. au centre du bâtonnet également en fer H.F. Cette variante est peu employée. Le réglage de la self-induction atteint ± 10 %.

3.2.3.2. — LES VIS.

Elles rendent réglables, soit les bâtonnets en fer H.F., soit les supports non magnétiques en matière synthétique qui comportent un pas de vis en leur centre.

La figure 7 - 2 montre un échantillonnage des vis pour matériel grand public. On remarque la rainure qui reçoit le frein en liège. Ce frein est indispensable afin d'immobiliser la vis et d'éviter les déréglages.

Les vis sont fabriquées dans les différentes poudres selon les fréquences d'utilisation. Elles permettent de modifier la valeur de la self-induction de la bobine de ± 10 %.

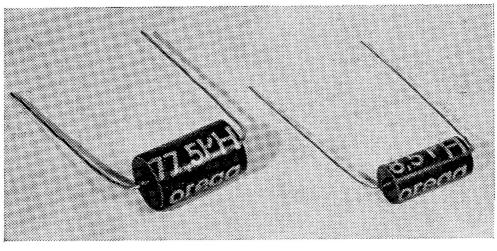


Fig. 7 - 1. — Bobines enrobées sur bâtonnet de fer H.F. (Isofer-Oréga).

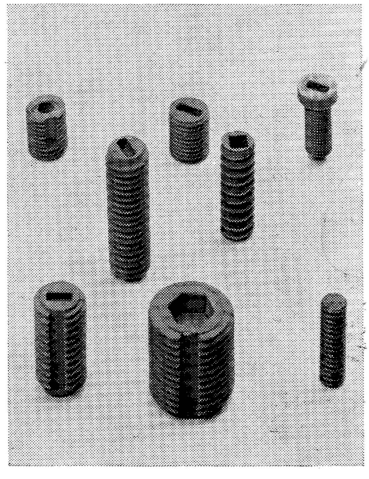


Fig. 7 - 2 (Ci-contre). — Echantillonnage de vis en fer H.F. (Oréga).

Elles sont universellement employées dans les supports plastiques qui deviennent de plus en plus petits (fig. 7 - 3). Le diamètre extérieur des supports est compris entre 6 et 18 mm, le diamètre des vis est respectivement compris entre 4,2 et 15 mm.

Ces vis ne conviennent pas pour le matériel professionnel. On leur préfère les bâtonnets munis d'une tige filetée en acier ou en cuivre. En effet, le pas d'une tige filetée est beaucoup plus fin que le pas qui peut être moulé ou extrudé sur une vis en fer H.F. Donc, un tour complet correspond à un déplacement linéaire plus faible dans le cas d'utilisation d'une tige filetée. Le réglage est plus précis et plus stable (fig. 7 - 4). La tige filetée doit être assez longue afin que le système de guidage métallique soit hors du champ magnétique de la bobine.

3.2.3.3. — LES POTS FERMÉS.

Avec ces modèles (fig. 7 - 5), le circuit magnétique est complètement fermé. Le champ de dispersion est faible. Le blindage peut être très près du pot sans entraîner des pertes appréciables. La perméabilité est maximale pour une matière magnétique donnée. La vis de réglage permet une variation de self-induction de ± 10 %.

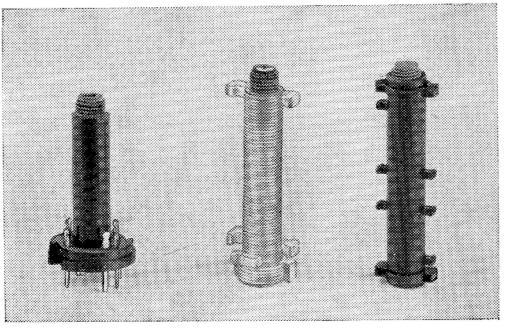


Fig. 7 - 3. — Supports plastiques contenant une vis en fer H.F. (Oréga).

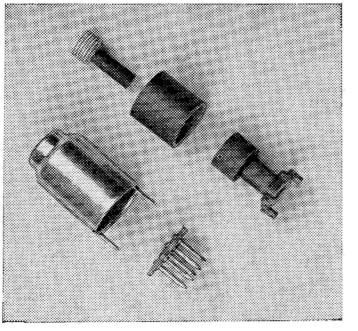
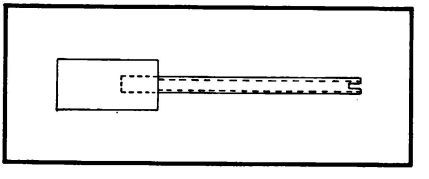


Fig. 7 - 5. — Pièces constitutives d'un pot fermé miniature pour récepteur à transistors (Cofidis-Oréga). On distingue la vis de réglage, la paroi extérieure et la partie intérieure du pot, ainsi que le blindage avec ses pattes de fixation et la pièce isolante avec ses cosses de sortie pour circuit imprimé.

Fig. 7 - 4. — Bâtonnet en fer H.F. à tige filetée.



Le bobinage est effectué à spires jointives ou en vrac dans une carcasse plastique appropriée au pot.

Puisque le circuit magnétique est fermé, il est beaucoup plus facile de calculer la perméabilité effective et donc le nombre de spires nécessaire pour un coefficient de self-induction désiré.

Le nombre de spires est donné par la formule simplifiée :

$$N = k \sqrt{L}$$

N : nombre de spires,

L : coefficient de self-induction en μH ou en mH selon les pots,

k : coefficient qui dépend du pot et qui est donné sur la notice du constructeur pour chacun de ses modèles.

Il faut ensuite vérifier si ce nombre de spires peut être bobiné sur la carcasse correspondante. Pour obtenir le coefficient de surtension le plus élevé on a intérêt de fractionner l'enroulement et d'utiliser des carcasses avec des gorges intermédiaires. On doit également employer un fil divisé avec le plus grand nombre de brins, donc d'un diamètre plus élevé.

La figure 7 - 6 donne en exemple les courbes publiées par *Oréga* pour un de ses pots fermés. Il existe trois carcasses pouvant être placées dans ce pot. Elles ont les mêmes dimensions extérieures : une ne possède pas de flasque intermédiaire (F 674), elle permet de loger le plus de fil, mais le coefficient de qualité est un peu inférieur. La seconde a un flasque intermédiaire (F 850), la troisième en comporte trois (F 390). Les courbes donnent le nombre de spires que l'on peut loger dans les carcasses en fonction du diamètre total du fil, isolement compris. Avec du fil de 0,22 mm total, c'est-à-dire 5 brins de 0,05 mm, isolement émail et 2 couches soie, on peut disposer respectivement 1 200 spires, 1 100 spires et 800 spires. Si ce nombre est insuffisant, il faut soit prendre un pot plus grand, soit un fil plus fin. Si au contraire, il est trop élevé, on peut adopter un fil divisé ayant un plus grand nombre de brins et donnant une qualité supérieure.

Les câbliers donnent dans leurs catalogues les diamètres extérieurs de leurs différents fils.

Il existe une grande variété de pots fermés aussi bien pour les applications grand public que professionnelles. Selon les matières magnétiques employées ils couvrent une gamme de fréquences très étendue, depuis quelques kHz ($\mu \approx 10$), jusqu'à plusieurs dizaines de MHz ($\mu \approx 2$).

Deux bobines placées dans un même pot magnétique sont couplées très fortement : 0,9 à 0,99. On peut également placer deux pots côte à côte sous un même blindage, le couplage est alors faible. S'il est insuffisant, on peut prévoir un léger entrefer afin d'augmenter les fuites, ou prévoir un couplage capacitif.

Pour certaines applications on préfère des pots coupés. A ce moment le circuit magnétique est incomplet, la perméabilité est plus faible et le blindage doit être plus efficace.

3.3. — Les supports magnétiques non métalliques : les ferrites.

3.3.1. — *FABRICATION.*

Ce sont les courants de Foucault qui limitent l'emploi des noyaux métalliques dans les bobinages. En H.F. on est obligé de réduire le métal en poudre, et la perméabilité est faible. Si on peut augmenter suffisamment la résistivité de la matière magnétique, les pertes sont alors réduites et l'utilisation sous forme de noyaux massifs peut être envisagée.

Les ferrites sont des céramiques magnétiques dont la résistivité est comprise entre 10^2 et 10^8 Ω.cm (fer 10^{-5} Ω.cm), et dont la perméabilité peut atteindre 3 000 dans certains cas.

Ce sont des oxydes binaires de la forme $M\,Fe_2\,O_4$ dans lesquels M représente un ou plusieurs métaux bivalents tels que le nickel, le manganèse, le zinc, le magnésium, le cuivre, etc...

Ils appartiennent au groupe des ferrites magnétiques doux à structure cubique analogue à celle de la magnétite $Fe_3\,O_4$ et à celle du spinelle minéral $Mg\,Al_2\,O_4$.

Les principaux ferrites utilisés sont à structure spinelle, d'autres sont à structure hexagonale ($Ba_6\,Fe_2\,O_3$) ou à structure grenat ($M_3\,Fe_5\,O_{12}$, M étant un métal trivalent).

La fabrication s'effectue comme celle des céramiques, mais sous atmosphère inerte et avec des cycles de température rigoureusement contrôlés.

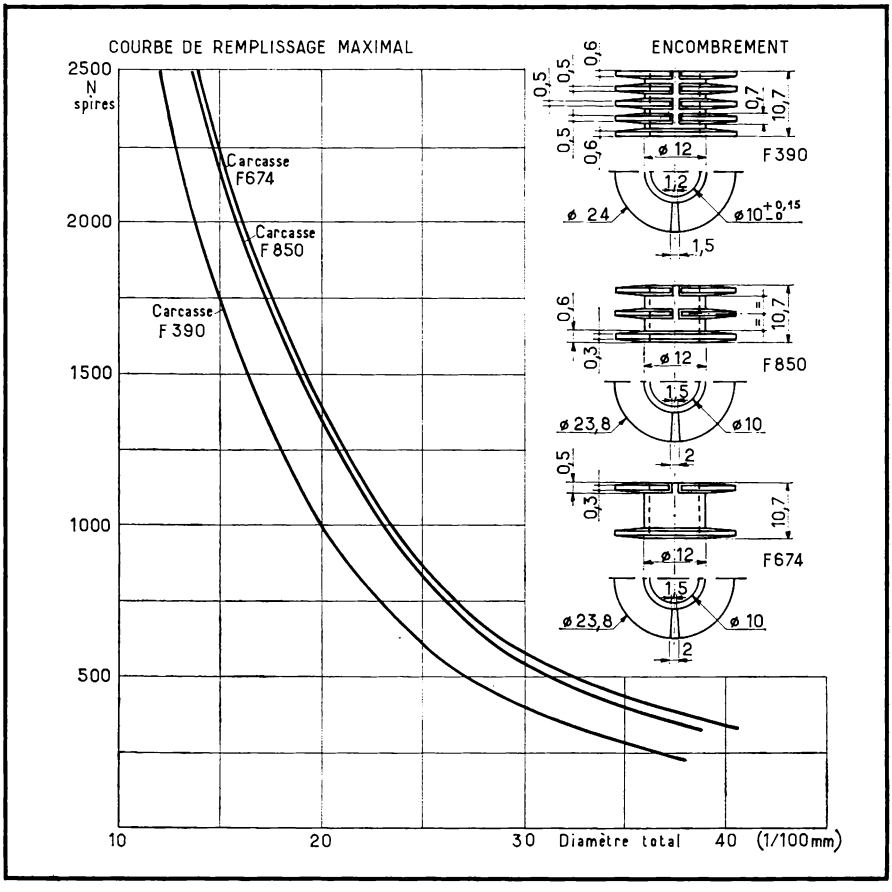


Fig. 7 - 6. — Exemple de courbe publiée par Oréga pour un de ses pots fermés.

Ls différents constituants sont broyés très finement et longuement mélangés. Puis, ils sont frittés à une température inférieure à celle de la fusion, sous pression mécanique (environ 1 500° C) et sous atmosphère inerte. Le cycle de refroidissement est très important.

Les pièces subissent au frittage un retrait linéaire moyen de 22 %. C'est pourquoi les dimensions des noyaux sont prévues sur les catalogues avec une tolérance de ± 2 %, avec une valeur minimale de ± 0,15 mm. Dans le cas où on exige des tolérances plus serrées, il faut prévoir une rectification ultérieure. C'est le cas des entrefers, par exemple, où on peut atteindre une précision de ± 0,01 mm.

Les principaux ferrites fabriqués sont les ferrites de manganèse et de zinc pour les fréquences inférieures à 1,5 MHz, les ferrites de nickel et de zinc entre 0,5 MHz et 100 MHz et les ferrites de cuivre et de manganèse pour les mémoires magnétiques.

3.3.2. — *CARACTÉRISTIQUES.*

Les ferrites sont fabriqués en France par *Cofelec, Coprim* et *L.T.T.*

Les ferrites de manganèse et de zinc ($f \leqslant 1{,}5$ MHz) sont appelés :

Ferrinox B ou T par *Cofelec, Ferroxcube 3* par *Coprim,* et *Fermalite* par *L.T.T.*

Les ferrites de nickel et de zinc ($f \leqslant 100$ MHz) sont catalogués :

Ferrinox H par *Cofelec, Ferroxcube 4* par *Coprim,* et *Fernilite* par *L.T.T.*

Les ferrites de cuivre et de zinc (mémoires magnétiques) sont dénommés :

Ferrinox M par *Cofelec,* et *Ferroxcube 6* par *Coprim.*

Les variétés fabriquées par ces trois constructeurs ne sont pas rigoureusement semblables et il est difficile d'établir un tableau de correspondance satisfaisant. C'est pourquoi les exemples doivent être pris sur un matériel déterminé.

Le tableau ci-après donne les principales caractéristiques des *Ferroxcubes* 3 et 4 *Coprim.* La figure 7 - 7 montre l'évolution des pertes en fonction de la fréquence pour ces mêmes variétés.

La *perméabilité initiale* (μi) est celle donnée par le constructeur sur son catalogue, elle est mesurée pour un champ assez faible de façon à se trouver sur une partie linéaire de la courbe.

Variétés de *Ferroxcube*	Perméabilité initiale à 20° C μi	Induction de saturation B 800 At/m (Wb/m²)	Champ coercitif H (At/m)	Point de Curie (°C)	Coef. de tempér. entre 20° et 50°C (10^{-6}/°C)	Résistivité ρ à 20°C (Ω.m)	Pertes tg δ/μ
3 A	1 400 ± 15 %	0,35	16	140	4,5	0,2	Voir courbes fig. 7 - 7
3 B 2	900 ± 20 %	0,40	24	150	2	0,8	
3 B 3	900 ± 20 %	0,40	24	150	2	1,2	
3 B 4	900 ± 20 %	0,40	24	150	4	0,2	
3 B 6	900 ± 20 %	—	—	140	2	0,2	
3 B 7	2 300 ± 20 %	0,34	—	170	± 0,6	0,8	
3 C 1	900 ± 25 %	0,35	32	150	—	0,6	
3 C 2	1 100 ± 20 %	0,35	32	150	4,5	0,8	
3 C 4	2 350 ± 20 %	0,35	—	150	4,5	0,6	
3 D 3	750 ± 20 %	—	—	150	2	1,5	
3 E 1	2 700 ± 20 %	0,35	—	125	4	0,3	
3 H 1	2 300 ± 20 %	0,35	—	170	0,6	1	
4 A	600 ± 20 %	—	32	125	6	10^3	
4 B	250 ± 20 %	—	112	250	8	10^3	
4 C	125 ± 20 %	—	320	350	12	10^3	
4 D	50 ± 20 %	—	560	400	15	10^3	
4 E	15 ± 20 %	—	1 100	500	15	10^3	
4 F	7 ± 20 %	0,21	6 000	600	35	10^3	

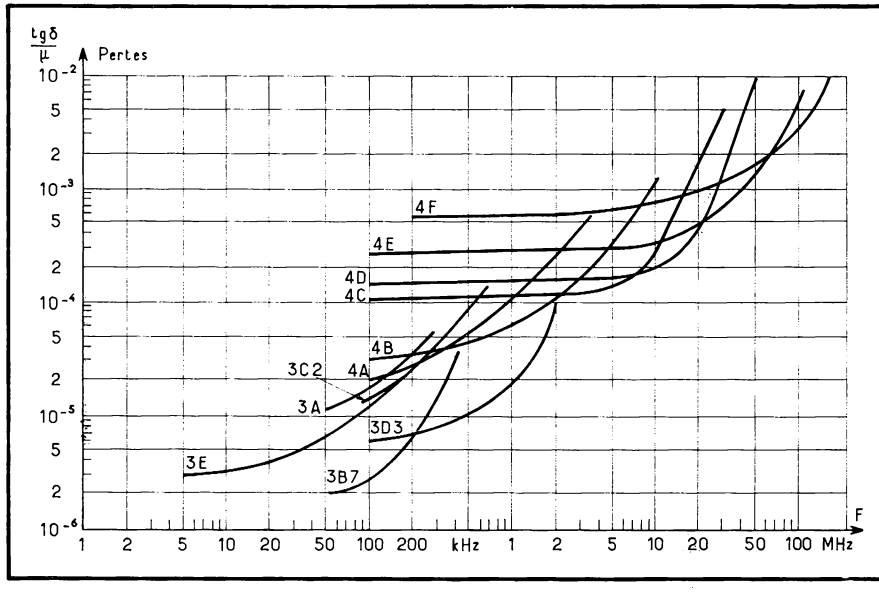


Fig. 7 - 7. — Pertes résiduelles de différentes variétés de Ferroxcube 3 et 4 (Coprim).

Les applications de ces différentes variétés sont les suivantes :

3 A : transformateurs de télécommunication à faible induction.
3 B : bobines de filtre, à faibles pertes et stabilité élevée.
- 3 B 2 : fréquences inférieures à 100 kHz.
- 3 B 3 : fréquences supérieures à 100 kHz sans dépasser 500 kHz.
- 3 B 4 - 3 B 6 : basses fréquences, bobines de Pupin en téléphonie.
- 3 B 7 : nouvelle version améliorée.

3 C : noyaux en U de grandes dimensions nécessitant une grande induction.
- 3 C 1 : transformateurs d'impulsions.
- 3 C 2 : bagues de déflexion et transformateurs de sortie lignes en télévision.
- 3 C 4 : nouvelle version améliorée pour la télévision.

3 D 3 : pots fermés pour filtres jusqu'à 700 kHz — bâtonnets pour antennes-cadres des récepteurs de radio.
3 E 1 : version améliorée de 3 A, couvre la plage 200 Hz à 5 MHz.
3 H 1 : pots fermés pour filtres jusqu'à 1,5 MHz.
4 A : mêmes usages que 3 B 3 pour pièces de grandes dimensions.
4 B : pour fréquences jusqu'à 2 MHz.
4 C : pour fréquences entre 2 et 5 MHz.
4 D : pour fréquences entre 5 et 20 MHz.
4 E : pour fréquences entre 20 et 50 MHz.
4 F : pour fréquences entre 50 et 100 MHz.

L'*induction de saturation* (B) est relativement plus faible que celle admise pour les autres matériaux ferromagnétiques et elle est obtenue avec des valeurs de *champ coercitif* (H) assez élevées. Il est rare malgré tout d'être limité par ces paramètres dans la plupart des applications.

Le *point de Curie* est défini, ici, pour des commodités de contrôle en fabrication, comme étant la température pour laquelle la perméabilité initiale retombe à la valeur qu'elle avait à 20° C. En effet, la perméabilité initiale augmente avec la température, atteint une valeur maximale au véritable point de Curie, puis diminue très rapidement. Il est compris entre 120° C et 600° C.

Le *coefficient de température* est positif aux températures usuelles d'utilisation. Le chiffre donné est une valeur moyenne prise entre 20° C et 50° C.

La *résistivité* est donnée, ici, en Ω.m. Dans les conditions normales d'utilisation, les courants de Foucault sont faibles. Les ferrites du type 3 ont une résistivité qui varie en fonction de la fréquence.

3.3.3. — *DIFFÉRENTS MODÈLES.*

3.3.3.1. — Les batonnets.

Il existe une grande variété de bâtonnets de ferrite. Il en est de très petits pour les bobinages F.I., d'autres plus gros et longs servent d'antenne-cadre pour les récepteurs. Selon la fréquence d'emploi ils sont fabriqués en différentes variétés de ferrite. Ils sont conformes à la norme C.C.T. C 93-220 (1961) pour les ferrites grand public. Les diamètres normalisés sont : 4,1, 8 et 9,7 mm.

Etant donné la grande dispersion du champ magnétique il est difficile de calculer le nombre de spires correspondant à une valeur de self-induction. Il faut opérer par tâtonnement et mesure directe.

Certains bâtonnets comportent des sorties axiales fixées dans le ferrite. On fabrique ainsi des bobines d'arrêt qui sont soudées dans le circuit comme des résistances.

Il est rare de fabriquer des vis en ferrite, on préfère surmouler une pièce en polystyrène sur un bâtonnet lisse. On obtient ainsi des bâtonnets de réglage qui s'adaptent au centre des supports synthétiques classiques.

3.3.3.2. — Les pots fermés.

Ils sont très nombreux dans les catalogues des fabricants. On rencontre des pots pour matériel grand public, simplifiés et relativement économiques. Les pots pour matériel professionnel sont des pièces de haute précision. Ils doivent satisfaire aux spécifications suivantes :

C.C.T. 06-02 (1959). — Circuits magnétiques en pots en ferrite et carcasses associées : caractéristiques dimensionnelles.

C.C.T. 06-04 (1962). — Circuits magnétiques en pots en ferrite : pots à coefficient de température défini voisin de zéro (entre 50 et 250 kHz).

C.C.T. 06-06 (1962). — Accessoires pour circuits magnétiques en pots en ferrite : fixation sur circuits imprimés.

C.E.I. 125 (1961). — Classification générale des matériaux en oxydes ferromagnétiques et définition des termes.

C.E.I. 133 (1961). — Dimensions des circuits magnétiques en pots en oxydes ferromagnétiques.

F.N.I.E. 007 (1958). — Circuits en ferrite pour transformateurs. Cette dernière spécification se rapporte surtout aux circuits en U I pour transformateurs de sortie lignes en télévision.

On voit que les dimensions des pots et des carcasses ont été normalisées, évitant une trop grande variété de modèles sur les catalogues des différents constructeurs. Les carcasses peuvent avoir un ou deux compartiments pour fractionner l'enroulement.

Les caractéristiques des ferrites ne sont pas encore normalisées, mais les spécifications fixent différentes valeurs d'inductance spécifique A_L.

L'inductance spécifique A_L est la valeur de self-induction en nH obtenue pour une spire dans le pot considéré. Afin d'éviter d'avoir autant de valeurs qu'il y a de pots et de variétés de ferrite, il a été décidé de normaliser une

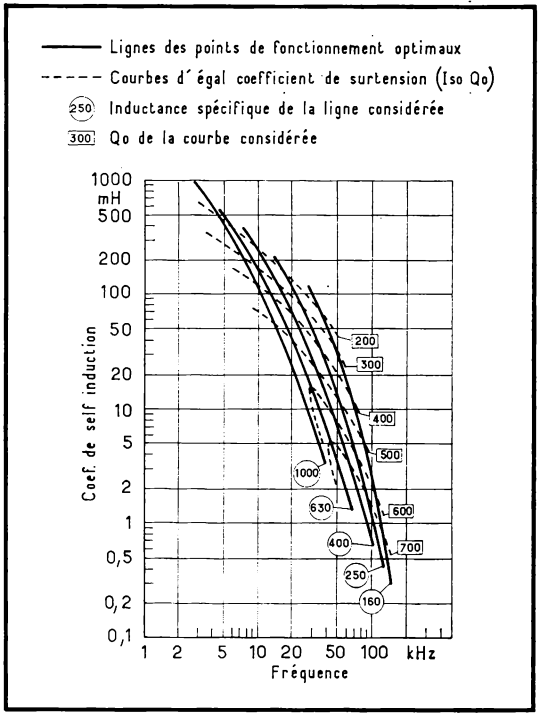


Fig. 7 - 8. — Diagramme pour le calcul des pots 18 × 11 mm en ferrite Ferrinox Cofelec.

série logarithmique, appelée série Renard R 5, qui est : 10 — 16 — 25 — 40 — 63 — 100.

Donc chacun des six pots normalisés n'est livré qu'en cinq variétés, soit 30 modèles en tout.

Le calcul d'un circuit magnétique consiste donc à choisir :

a) les dimensions du pot : 14 × 8 — 18 × 11 — 22 × 13 — 26 × 16 — 30 × 19 ou 36 × 22 mm;

b) l'inductance spécifique permettant d'obtenir la valeur de self-induction désirée, avec le coefficient de surtension nécessaire au circuit. $L = N^2 A_L$, où L en nH, N nombre de spires.

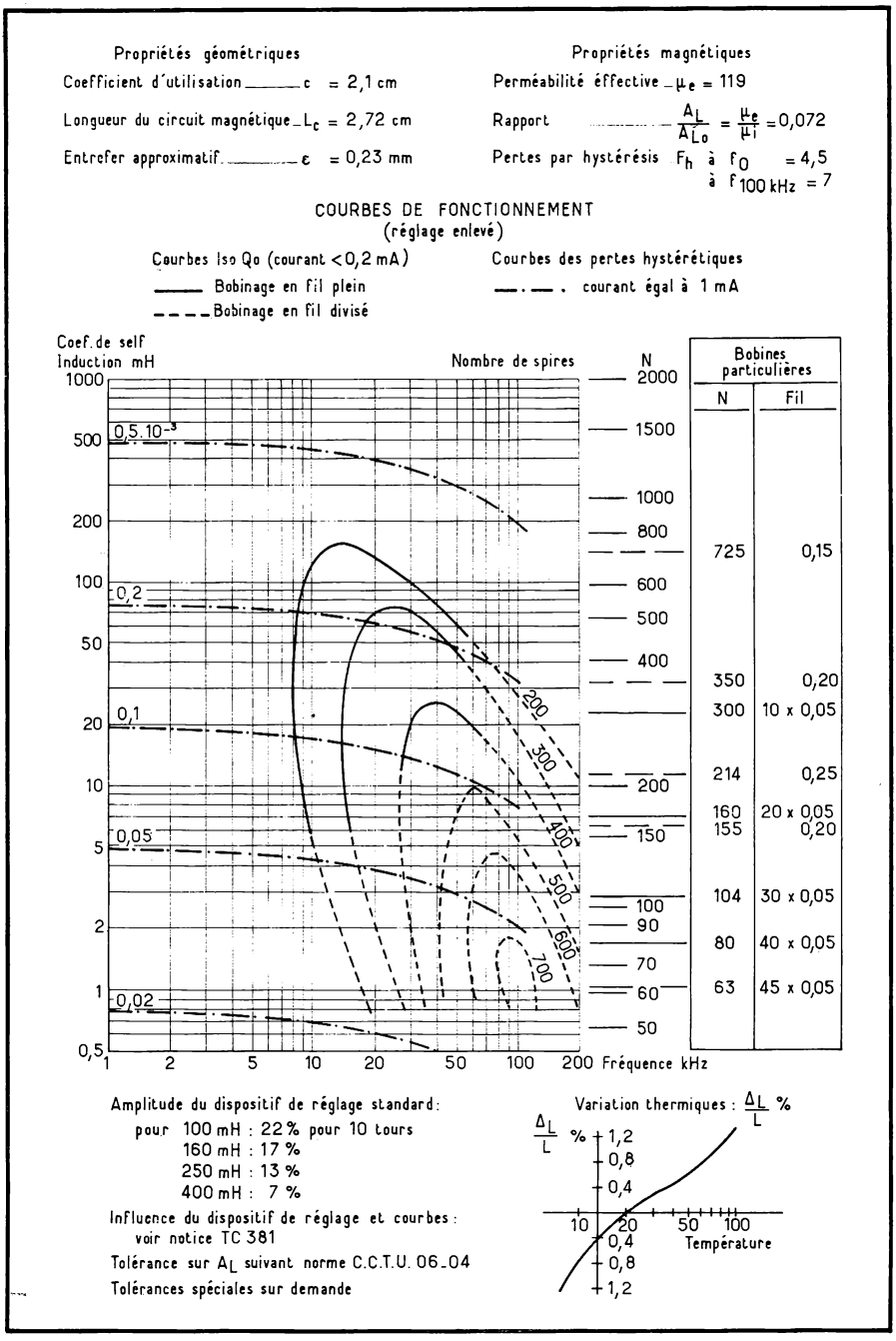


Fig. 7 - 9. — Diagramme pour le calcul des pots 18×11 mm et pour AL = 250 mH (Ferrinox Cofelec).

Il faudra ensuite vérifier si le nombre de spires nécessaire se loge bien dans la carcasse du pot en employant un fil convenable.

Cofelec a établi des diagrammes pour chacun des pots normalisés permettant de simplifier les calculs.

La figure 7 - 8 donne en exemple le diagramme correspondant au pot 18 × 11 mm. Il comprend quatre variables : le coefficient de self-induction en mH, la fréquence d'emploi en kHz, le coefficient de surtension Q et l'inductance spécifique A_L normalisée.

Soit à construire un bobinage de 10 mH fonctionnant à 55 kHz. On voit qu'en choisissant $A_L = 250$ nH on obtient un coefficient de surtension de 500.

Il suffit de se reporter à la feuille du catalogue correspondant au pot 18 × 11 mm, inductance $A_L = 250$ nH pour avoir les autres paramètres (fig 7 - 9).

Pour 10 mH et Q = 500 à 55 kHz, il faut employer du fil divisé et en bobiner 200 spires (échelle de droite). Les pertes hystérétiques pour un courant de 1 mA sont d'environ $0{,}075.10^{-3}$ (courbes en trait mixte).

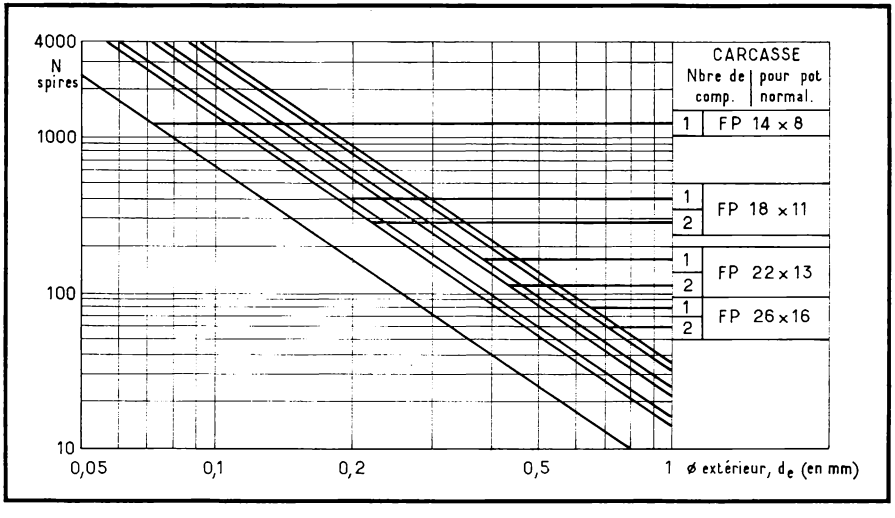


Fig. 7 - 10. — Abaque de bobinage pour les différents pots normalisés avec carcasse en 1 ou 2 compartiments (Cofelec).

Enfin, l'abaque de bobinage (fig. 7 - 10) montre que pour un pot 18 × 11 avec une carcasse simple et 200 spires, il ne faut pas dépasser 0,25 mm de diamètre extérieur total pour le fil avec un coefficient de remplissage de 95 %. Il faut donc choisir : soit du fil 10 brins 0,05 mm, soit du fil 15 brins 0,04 mm.

La figure 7 - 11 montre les différentes pièces constituant le pot *Cofelec* professionnel.

Les pertes dans le bobinage (Joule, Foucault, capacité répartie) et dans le matériau magnétique (hystérésis, Foucault, pertes résiduelles) doivent être équilibrées pour obtenir le meilleur rendement.

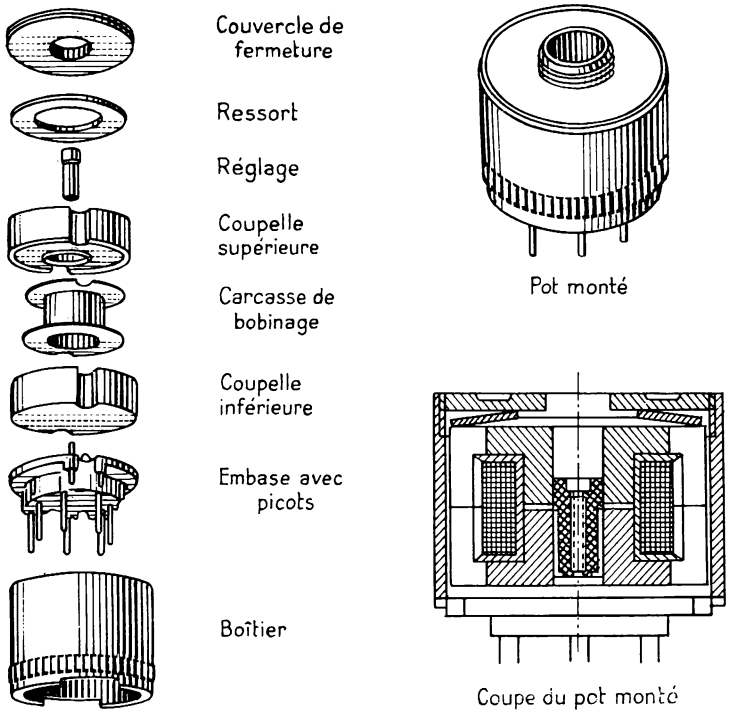


Fig. 7 - 11. — Pot fermé en ferrite conforme à la norme CCT 06-02 (Ferrinox Cofelec).

En général :

— *Aux fréquences inférieures à 100 kHz,* on cherche à diminuer les pertes dans le bobinage en choisissant un pot de volume important et de forte inductance spécifique. Le fil divisé à brins de 0,05 à 0,07 mm convient.

— *Aux fréquences moyennes,* entre 100 et 300 kHz, on doit obtenir le coefficient de surtension (Q) le plus élevé possible, en réduisant les pertes du bobinage et du matériau magnétique.

— *Aux fréquences élevées* au-dessus de 300 kHz, il faut choisir un pot le plus petit possible, une inductance spécifique faible. On adopte une carcasse à gorges multiples pour réduire la capacité répartie de l'enroulement. De plus, on ne cherche pas à remplir le pot complètement.

Si une polarisation continue est superposée au signal H.F. les pertes augmentent rapidement et il est très difficile d'effectuer des calculs précis. En effet, la perméabilité réelle varie dans de grandes proportions en fonction du courant continu. Il faut éviter dans toute la mesure du possible une telle utilisation des pots en ferrite.

3.3.3.3. — Les pièces diverses.

Elles sortent du cadre de cet ouvrage, mais il convient de citer :

— les circuits en U I ou en E I pour les transformateurs de puissance

(impulsions, télévision, etc...),

— les bagues de déflexion pour la télévision,

— les pièces spéciales pour hyperfréquences (rotation de Faraday, déplacement de champ, résonance gyromagnétique jusqu'à 14 000 MHz),

— les mémoires magnétiques à cycle d'hystérésis rectangulaire,

— les pièces pour transducteurs piézo-magnétiques (générateurs d'ultrasons).

4. — LE BOBINAGE.

4.1. — La machine à bobiner.

Les machines à spires rangées ont été étudiées au chapitre VI, il n'y a pas lieu d'y revenir. Les modèles spéciaux pour H.F. ont des dimensions plus réduites puisque les bobines sont plus petites. Il existe des machines automatiques produisant une grande variété de bobines en très grandes séries sans

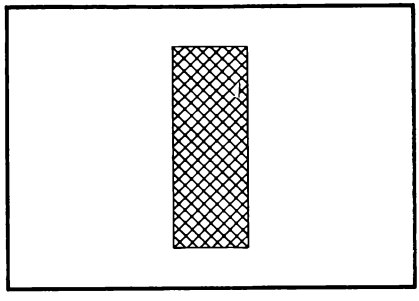


Fig. 7 - 12. — Le bobinage en nid d'abeilles.

aucune intervention manuelle. Ces machines n'intéressent que quelques industriels et c'est pourquoi il ne semble pas utile de les décrire.

LES MACHINES A BOBINER EN NID D'ABEILLES.

Elles sont particulières à la H.F.

On appelle nid d'abeilles un bobinage spécial dont le fil effectue un ou plusieurs aller-retour de la largeur de la bobine à chaque tour de rotation du support. Grâce à un léger décalage les spires sont espacées. Le bobinage est aéré et sa capacité répartie est plus réduite. Comme les fils se croisent sous un certain angle, le bobinage terminé présente des alvéoles ressemblant un peu aux rayons de miel des abeilles (fig. 7 - 12).

La machine (fig. 7 - 13) comprend les mêmes organes de base qu'une machine à spires rangées.

Le moteur entraîne d'une part la broche de bobinage et d'autre part le guide-fil qui est spécial. Il s'appelle un pied-de-biche et il est en contact avec la bobine de façon à déposer le fil à l'endroit voulu. Il est animé d'un mouvement de va-et-vient dont l'amplitude est égale à la largeur de la bobine et dont la fréquence est fonction de la vitesse de rotation de la broche et du type de bobinage en cours.

La largeur de la bobine est réglée au moyen d'un index que l'on déplace devant un cadran gradué.

La fréquence du mouvement est donnée par un jeu d'engrenages amovibles placés entre la broche et une came qui imprime le déplacement latéral au pied-de-biche. Les machines sont livrées avec 12 engrenages permettant toutes les combinaisons.

Trois types principaux de bobinages sont employés : le simple vague, le demi-vague et le double vague (fig. 7 - 14).

Bobinage simple vague.

Le guide-fil (pied-de-biche) fait un aller-retour pour chaque tour de broche. C'est le pas le plus utilisé pour les bobines courantes. On a vu que la forme la meilleure est le carré, c'est-à-dire lorsque l'épaisseur du bobinage est égale à sa largeur.

Le nombre de rayons du fond de panier est toujours égal au nombre de dents de l'engrenage monté sur la broche. Ce nombre de dents est fonction du diamètre moyen du bobinage. Le second engrenage est choisi en fonction du diamètre du fil et de l'espacement désiré (interfil). En règle générale un décalage d'une dent, en plus ou en moins, suffit. On considère qu'une distance de 2 mm entre rayons au départ donne de bons résultats. Le réglage d'une machine en nid d'abeilles s'effectue par tâtonnements d'une façon assez empirique.

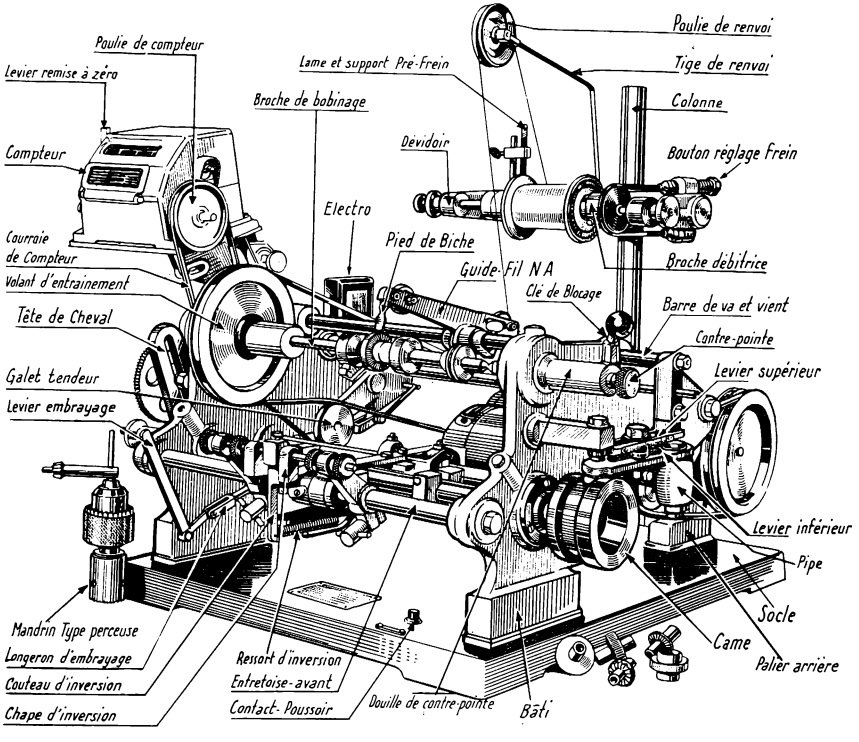


Fig. 7 - 13. — Machine à bobiner (Laurent **F.R.**).

BOBINAGE DEMI-VAGUE.

Le guide-fil effectue deux aller-retour pour un tour de broche. Ce type de bobinage est à préférer pour les bobinages hauts et étroits ; par exemple un bobinage pour T.H.T. en télévision qui a 2 mm de largeur et 20 mm de hauteur. Il faut doubler le nombre de dents de l'engrenage monté sur la broche et maintenir le même engrenage sur le guide-fil. Afin que le fil ne « tombe » pas sur un tel bobinage, il faut encoller la bobine en cours de fabrication.

BOBINAGE DOUBLE VAGUE.

Le guide-fil effectue un aller-retour pour deux tours de la broche. On adopte ce type de bobinage pour les enroulements larges et comportant un grand nombre de spires. Le nombre de rayons du fond de panier est la moitié du nombre de dents du pignon monté sur la broche. On place sur le guide-fil un engrenage ayant le double de dents de celui de la broche, avec un décalage initial de deux dents (exemple : 30 × 62 dents).

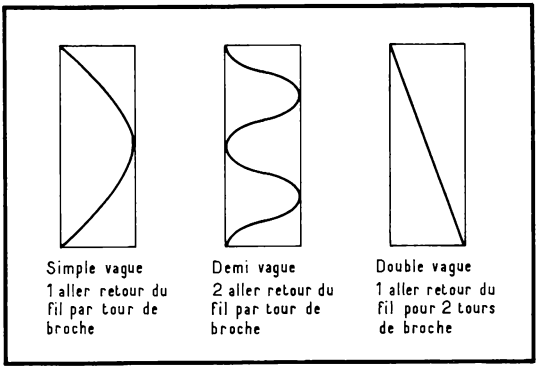


Fig. 7 - 14. — Différents bobinages en nids d'abeilles (la spire étant représentée déployée).

4.2. — L'imprégnation des bobines.

Les bobinages, aussitôt après leur fabrication, passent par un premier contrôle afin de vérifier leur aspect, leur continuité électrique et la valeur de leur self-induction.

En fabrication industrielle, pour éviter les déchets, on prévoit sur les bobines à grand nombre de tours quelques spires supplémentaires. Ainsi, on ne trouve jamais de bobines « faibles ». Les bobines un peu trop « fortes » en self-induction sont ajustées en enlevant quelques spires.

Puis, les bobines sont séchées en étuve pour éliminer l'humidité. Immédiatement après elles sont imprégnées.

Les bobinages « grand public » sont imprégnés au trempé. On les plonge dans un bain de cire microcristalline minérale (Ozokérite, Cérésine, etc...) ou de cire thermoplastique (Cirowosk...). Le bain doit être bien fluide et les bobines chauffées avant d'y être plongées. Selon les produits, sa température est comprise entre 90° C et 130°C. Après quelques minutes les bulles d'air cessent de se dégager, l'imprégnation est terminée. Les bobines sont égouttées et elles se refroidissent normalement à l'air.

Si on désire *enrober* les bobines imprégnées, il faut lorsqu'elles sont froides les plonger quelques secondes dans un bain moins chaud, c'est-à-dire moins fluide (entre 85° C et 110° C). Une croûte de cire recouvre alors l'enroulement.

Le matériel professionnel est parfois protégé au moyen des mêmes produits. Si cette protection est jugée insuffisante, il peut être entièrement enrobé avec des plastiques de la catégorie de l'Araldite. Cet enrobage s'effectue à la température ordinaire, ce qui est un avantage pour certains supports qui ne peuvent admettre un échauffement de l'ordre de 100° C.

5. — LES BOBINAGES POUR RÉCEPTEURS GRAND PUBLIC A MODULATION D'AMPLITUDE.

5.1. — Généralités.

Un récepteur est composé des étages suivants (fig. 7 - 15) :

— un étage d'entrée ou modulation relié à une antenne ou à un cadre,
— un oscillateur local, car il s'agit du montage superhétérodyne,
— un amplificateur à fréquence intermédiaire (F.I.),
— une détection,
— un ensemble basse fréquence,
— une alimentation par le secteur ou par des piles.

Il s'agit d'étudier ce récepteur depuis l'entrée jusqu'à la détection comprise du point de vue bobinages.

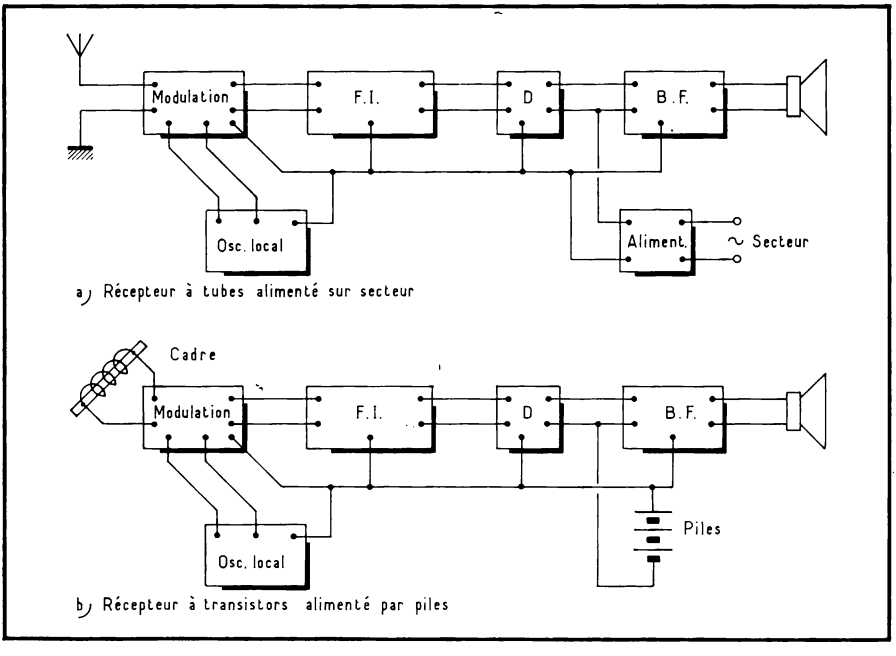


Fig. 7 - 15. — Composition schématique d'un récepteur.

Ils sont différents selon que l'appareil est équipé de tubes ou selon qu'il est équipé de transistors. Les bobinages d'entrée sont également différents s'ils sont reliés à une antenne et à une prise de terre ou à un cadre.

De plus, un récepteur ne comporte pas qu'une seule gamme ; il doit pouvoir capter les différentes plages réservées à la radiodiffusion et appelées « grandes ondes », « petites ondes » et « ondes courtes ». Les bobinages correspondants doivent pouvoir être commutés.

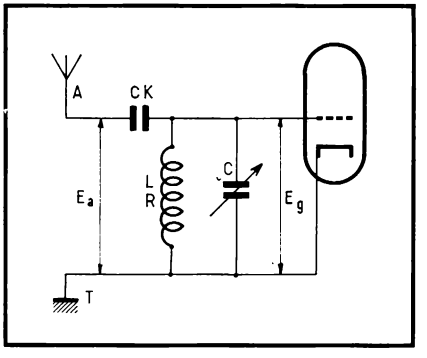


Fig. 7 - 16. — Le couplage capacitif en tête.

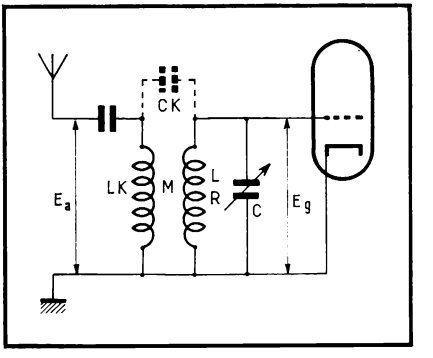


Fig. 7 - 17. — Le couplage par induction mutuelle.

L'étude complète de ces différents cas nécessiterait un volume entier. Il est donc nécessaire de n'aborder que la technologie de ces bobinages et de renvoyer le lecteur intéressé aux ouvrages spécialisés.

Les bobinages seront étudiés en partant de l'antenne ou du cadre jusqu'à la détection.

5.2. — L'étage d'entrée.

5.2.1. — *RÉCEPTION SUR ANTENNE.*

Parmi les principaux circuits de couplage, on utilise surtout :

— *Le couplage capacitif en tête* (fig. 7 - 16).

Le circuit accordé (L, R, C) est couplé à l'antenne par C_K. La tension entre antenne et terre est E_a, la tension entre grille et cathode du tube est E_g. Le gain du circuit est :

$$G = \frac{E_g}{E_a} = \frac{L\,\omega}{R} \cdot \frac{C_K}{C + C_K}$$

En P.O., par exemple, un circuit a L = 180 µH, C_K = 50 pF ;

à 1 500 kHz : $\frac{L\,\omega}{R} = 100$, C = 55 pF ;

à 550 kHz : $\frac{L\,\omega}{R} = 150$, C = 420 pF ;

le gain est de 47,5 à 1 500 kHz et de 16 à 550 kHz.

Ce circuit avantage les fréquences élevées de la plage couverte, de plus sa sélectivité est moyenne et l'antenne exerce une grande influence.

— *Le couplage par induction mutuelle.*

Deux cas sont à considérer (fig. 7 - 17) :

a) *l'inductance primaire est petite par rapport à l'inductance secondaire* (primaire à basse impédance). En effet, la fréquence propre de L_K ne doit pas se situer dans la gamme couverte, elle doit être au-dessus ou au-dessous de cette plage.

Si f_K est la fréquence propre du primaire et f la fréquence d'accord du secondaire, on a :

$$G = \frac{M}{L_K} \cdot \frac{L\omega}{R} \cdot \frac{f^2}{f_K^2 - f^2}$$

Puisque l'inductance primaire est petite devant l'inductance secondaire f_K est supérieure à f. M est l'induction mutuelle provoquée par le couplage de L_K et de L.

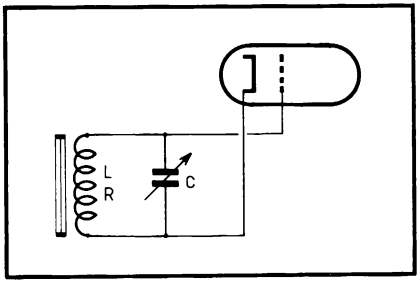


Fig. 7 - 18 (Ci-contre). — La réception sur cadre.

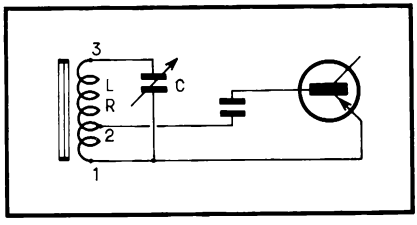


Fig. 7 - 19 (Ci-contre). — La réception sur cadre pour transistors.

Si M = 5 µH, L_K = 100 µH, f = 1 500 kHz et f_K = 1 800 kHz, on a G = 11,25. Avec les mêmes valeurs à 550 kHz, G = 0,75.

Les fréquences élevées sont favorisées. Le rapport entre les gains est trop important. C'est une solution économique peu recommandable.

b) *L'inductance primaire est grande par rapport à l'inductance secondaire* (primaire à haute impédance). On a alors :

$$G = \frac{M}{L_K} \cdot \frac{L\omega}{R} \cdot \frac{f^2}{f^2 - f_K^2}$$

Si M = 50 µH, L_K = 2 000 µH et f_K = 400 kHz, le gain est de 2,75 à 1 500 kHz et 7,5 à 550 kHz.

Le gain est assez uniforme tout en favorisant les fréquences basses de la gamme. En ajoutant une faible capacité en tête C_K, on peut obtenir un gain rigoureusement constant et voisin de 7.

Pour éviter un déréglage des circuits dû aux diverses antennes utilisées, on intercale dans le primaire un condensateur C_a de faible valeur (50 à 100 pF). Ainsi la capacité de l'antenne n'a plus d'importance.

5.2.2. — *RÉCEPTION SUR CADRE.*

A l'origine de la radio, on bobinait le circuit d'accord sur un cadre en bois ou en bakélite de grande dimension. La hauteur efficace de cet enroulement assurait une captation suffisante de l'énergie haute fréquence. L'orientation du bobinage accroissait la sélectivité du récepteur.

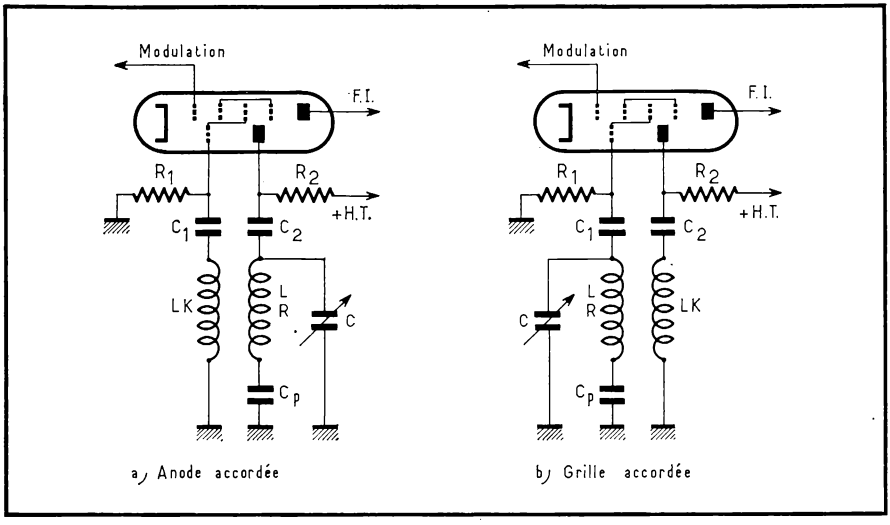


Fig. 7 - 20. — Circuit oscillateur à anode ou à grille accordée.

Grâce à la perméabilité élevée des bâtonnets de ferrite, un simple enroulement bobiné sur le ferrite permet d'avoir un pouvoir de captation suffisant, sous un plus faible volume. C'est la solution moderne adoptée aussi bien pour les récepteurs à tubes que pour les récepteurs à transistors (fig. 7 - 18).

Les lampes ont une impédance d'entrée élevée qui n'amortit pas le bobinage, il n'y a aucune précaution à prendre. Le circuit oscillant se calcule d'une façon classique.

Les transistors ont une impédance d'entrée faible (environ 1 à 2 kΩ), et il faut prévoir une adaptation des impédances pour éviter d'amortir par trop le circuit d'entrée (fig. 7 - 19).

Par exemple, avec un transistor SFT 320 et un bâtonnet de ferrite de 175 mm de longueur et 9,7 mm de diamètre, on a C = 280 pF. Entre 1 et 2 il y a 9,5 spires et entre 1 et 3 on en compte 190, en fil divisé 5 × 0,07 mm. Malgré l'amortissement de 2 kΩ entre 1 et 2, on obtient un coefficient de surtension de 200 entre 1 et 3, ce qui permet d'avoir une bonne courbe de sélectivité et une bonne sensibilité.

5.3. — L'étage oscillateur.

Le montage superhétérodyne consiste à faire interférer l'onde à recevoir ou modulation avec une fréquence voisine produite localement par un oscillateur. Le battement de ces deux fréquences donne un signal égal à leur différence appelé « *fréquence intermédiaire* ».

5.3.1. — *OSCILLATEUR A TUBE.*

Ce tube possède généralement deux grilles de commande spécialisées, une pour la modulation, l'autre pour l'oscillation. Le mélange électronique a lieu dans le tube et on recueille la fréquence intermédiaire dans le circuit anodique.

Un oscillateur doit comprendre un circuit accordé et un circuit d'entretien. C'est l'anode ou la grille oscillatrice qui peuvent être accordées (fig. 7 - 20).

Le schéma à anode accordée est le plus courant avec les tubes triode-hexode modernes. Il donne une tension d'oscillation plus constante sur toute l'étendue de la plage couverte. De plus, la tension de C.A.G. (contrôle automatique de gain) peut être appliquée sur la grille modulatrice sans répercussion sur le circuit oscillateur.

Le schéma à grille accordée donne une tension oscillatrice plus élevée. Il est parfois employé avec des tubes heptode dont la pente de conversion est plus faible.

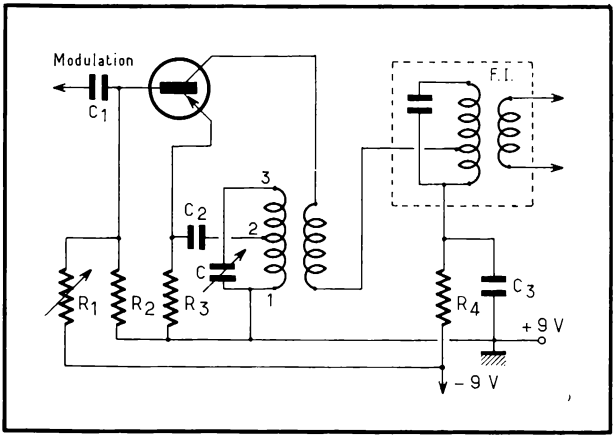


Fig. 7 - 21. — Schéma à conversion additive pour le changement de fréquence à transistor.

Le circuit L-R-C se calcule d'une façon classique selon la gamme à couvrir. Par exemple, en P.O., la gamme à recevoir s'étend de 1 600 à 520 kHz. La valeur de la fréquence intermédiaire est de 480 kHz. C'est évidemment le battement supérieur qui doit être choisi. Le circuit oscillateur doit donc couvrir la plage de 1 600 + 480 = 2 080 kHz à 520 + 480 = 1 000 kHz. On remarque de suite que le rapport entre les fréquences extrêmes est plus faible pour le circuit oscillateur (2 080/1 000 $\approx$ 2) que pour le circuit d'entrée (1 600/520 $\approx$ 3) ; la variation de capacité du condensateur oscillateur doit être plus faible. C'est pour limiter cette variation et permettre la commande unique du récepteur qu'il est prévu le condensateur C_P. Avec une capacité résiduelle du circuit de 60 pF et une variation de capacité de 280 pF, la valeur de L est voisine de 100 µH, c'est-à-dire moins que la bobine antenne.

On réalise cette bobine en nid d'abeilles sur un mandrin plastique avec une vis de réglage en fer divisé. L'enroulement de réaction est plus ou moins important selon le tube utilisé et le schéma adopté. Il est de l'ordre d'une dizaine de spires bobinées sur le circuit accordé.

Les condensateurs de liaison sont isolés au mica ou au film plastique, leur valeur est faible : C_1 environ 50 pF, C_2 environ 500 pF.

5.3.2. — *OSCILLATEUR A TRANSISTOR.*

Le transistor n'a qu'une électrode de commande et les schémas à tubes ne peuvent être transposés. On peut, certes, effectuer le changement de fréquence au moyen de deux transistors, un pour la modulation et le mélange, le second

pour l'oscillation. Ce schéma est coûteux et on obtient maintenant des résultats équivalents avec un seul transistor.

C'est le schéma à « conversion additive » qui est adopté (fig. 7 - 21). Le signal H.F. est appliqué entre base et émetteur. Les résistances R_1 et R_2 servent à polariser convenablement la base. Le condensateur C_1 est nécessaire afin de ne pas court-circuiter la polarisation par le bobinage d'accord H.F. Le circuit oscillant est intercalé entre l'émetteur et le collecteur. Le circuit accordé est relié au collecteur au moyen de la capacité C_2. Afin de ne pas amortir le circuit par la faible résistance d'entrée de l'émetteur, la liaison s'effectue par une prise sur le bobinage. C'est le même problème que pour le circuit d'entrée et qui se retrouve à tous les étages.

L'entretien des oscillations est assuré par un enroulement placé dans le collecteur en série avec le primaire du premier transformateur à fréquence intermédiaire.

On ajoute donc dans le transistor le signal oscillateur au signal H.F. et on recueille le battement dans le transformateur F.I.

Le gain de conversion de l'étage est fonction du courant collecteur. Celui-ci est réglé par la polarisation de la base (résistance ajustable R_1). Le gain le plus stable et le bruit de fond le plus faible sont obtenus pour un courant collecteur d'environ 500 µA, c'est cette valeur qui est généralement retenue. A ce moment la tension d'oscillation est d'environ 0,1 V et le gain de conversion dépasse 30 dB.

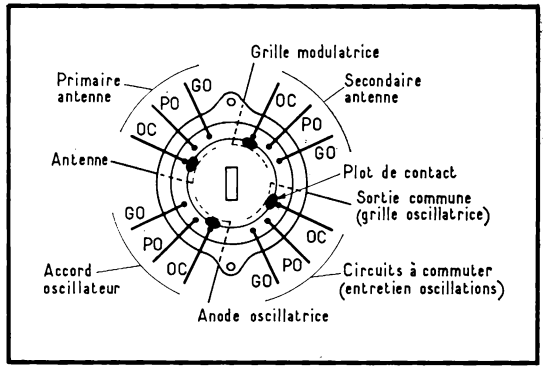


Fig. 7 - 22. — Principe du commutateur rotatif.

On remarque que dans ce schéma il n'y a pas de condensateur en série (padding C_P). Pour simplifier, on préfère utiliser des condensateurs variables à deux cages inégales. Le condensateur oscillateur a une valeur plus faible que celle du condensateur d'accord. Le rapport entre ces deux valeurs permet de réaliser la commande unique sans padding.

Ce bobinage est effectué le plus souvent en vrac dans un pot fermé en fer divisé de façon à obtenir un coefficient de surtension élevé malgré l'amortissement du transistor.

A titre d'exemple : *Oscillateur P.O.*, C = 120 pF, bobinage L entre 1 et 2 = 3 spires, entre 1 et 3 = 90 spires, L_K = 10 spires, fil divisé 5 × 0,05. La surtension atteint 150 (à 630 kHz).

La tension de C.A.G. ne peut pas être appliquée sur le transistor convertisseur car son action viendrait perturber le fonctionnement de l'oscillateur local.

5.4. — Les commutations.

Elles sont nécessaires pour la réception de plusieurs gammes.

Les récepteurs classiques à modulation d'amplitude reçoivent de 2 à 5 gammes, c'est-à-dire : P.O., G.O. (pour les récepteurs simples) et jusqu'à G.O., P.O. et 3 gammes O.C. (de 13 à 150 m) pour les récepteurs les plus complets. Il faut donc prévoir autant de jeux de bobinages qu'il y a de gammes et les commuter entre eux, soit par un clavier à touches, soit par un contacteur rotatif.

Le commutateur rotatif (fig. 7 - 22) est le plus ancien et il tend à être abandonné. Une galette complète reçoit sur sa périphérie 12 contacts fixes. S'il s'agit d'un récepteur à trois gammes, on place quatre rails de longueur voulue sous la galette. Le produit du nombre de circuits par le nombre de positions

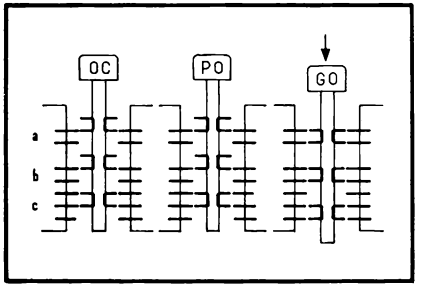


Fig. 7 - 23. — Principe du commutateur à clavier.

doit donner 12 au maximum, c'est-à-dire 4 circuits à 3 positions, ou 3 circuits à 4 positions, ou encore 2 circuits à 6 positions. Pour un récepteur à 5 gammes, on ne peut placer que deux circuits par galette.

L'axe du commutateur passe par un orifice au centre de la partie mobile et entraîne un disque en bakélite H.F. comportant autant de grains d'argent qu'il y a de circuits (4 dans l'exemple choisi). Chacun des grains établit le contact entre le rail et l'un des contacts fixes.

La sortie commune aboutissant au rail fixe est reliée au circuit du récepteur et les contacts sont soudés aux différents bobinages. Dans l'exemple de la figure 7 - 22, on voit nettement les quatre commutations nécessaires pour un superhétérodyne et la position des bobinages.

Pour les récepteurs simples, une galette est suffisante; pour les récepteurs plus complets il en faut deux pour assurer toutes les commutations. Elles sont, bien entendu, enfilées sur le même axe et montées sur le même encliquetage mécanique assurant la rigueur du positionnement des gammes.

Le commutateur à clavier est tout différent (fig. 7 - 23) ; chacune des touches correspond à une gamme. En enfonçant une touche on libère mécaniquement les autres qui, sous la poussée d'un ressort, remontent à leur position de repos. Les contacts sont fixés sur une plaquette de bakélite H.F. faisant corps avec le bloc de bobinages. Les touches comprennent un certain nombre de cavaliers qui mettent en relation deux contacts fixes. Les rangées de contacts *a* et *b* sont en court-circuit lorsque la touche correspondante est enfoncée. La rangée *c* est prévue pour une inversion. Lorsque la touche est au repos ce sont les deux contacts du haut qui sont reliés. Lorsque la touche est enfoncée ce sont les deux contacts du bas qui sont réunis.

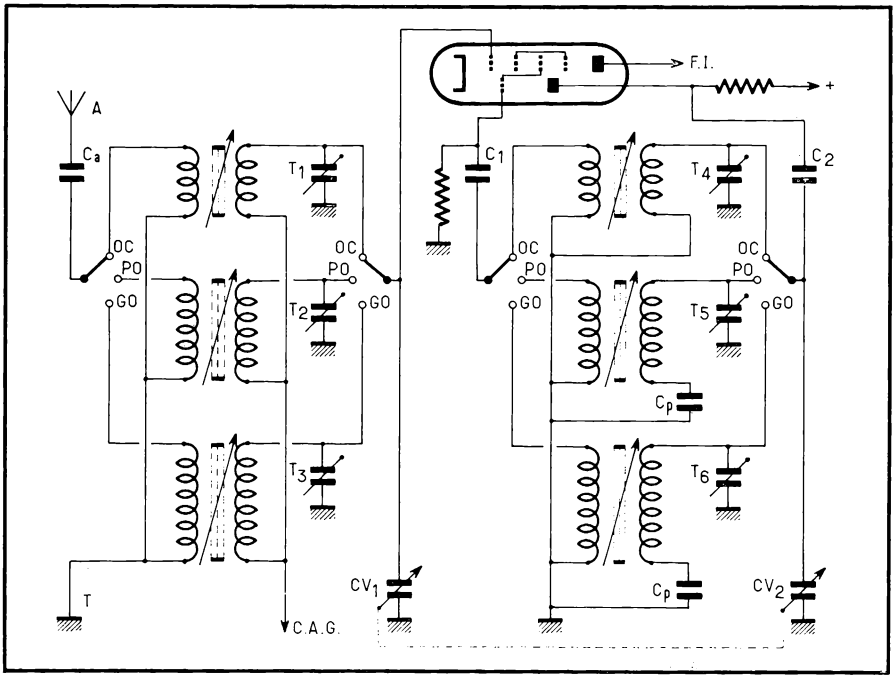


Fig. 7 - 24. — Schéma classique pour la réception des trois gammes (G.O. - P.O. - O.C.).

Ce procédé est très souple, car les contacts fixes peuvent être montés selon le schéma à réaliser.

Les points du circuit sont réunis à une ligne horizontale de contacts supérieurs ; les bobinages sont reliés au contact inférieur correspondant à la gamme à recevoir.

Les commutateurs doivent satisfaire aux normes U.T.E. C 93-410 (1959) et C 93-411 (1959) ainsi qu'à la spécification F.N.I.E. 034. En particulier, la résistance de contact doit être inférieure à 0,015 Ω, et la capacité des contacts entre eux et par rapport à la masse doit être inférieure à 2 pF.

Ils sont montés sur de la bakélite H.F. et les contacts sont en chrysocale argenté.

5.5. — Les schémas pour la réception de plusieurs gammes.

5.5.1. — *LES RÉCEPTEURS A TUBES.*

La figure 7 - 24 donne le schéma classique et complet pour la réception des trois gammes principales. Il s'agit d'un récepteur à tubes sur antenne et sur terre avec commutateur rotatif.

Les bobinages d'antenne comprennent tous un primaire à haute impédance et un secondaire accordé. La valeur de l'inductance est réglée par une vis en fer divisé. Afin de faire correspondre les gravures du cadran avec les stations reçues, il est prévu un condensateur parallèle (trimmers T_1, T_2, T_3) ajustable sur chacune des gammes.

Les condensateurs variables CV1 antenne et CV2 oscillateur sont formés par les deux cages égales d'un même ensemble. Leur variation de capacité est égale et simultanée ; c'est le principe de la commande unique.

Les bobinages d'oscillation locale comprennent un enroulement accordé dont la valeur de self-induction est réglable au moyen d'une vis en fer H.F. Les trimmers T_4, T_5, T_6 permettent de régler la commande unique en haut de gamme (vers 1 400 kHz). Les paddings C_p réduisent la variation de capacité d'accord en bas de gamme (vers 600 kHz). Généralement, on omet le padding en O.C. par suite de la faible sélectivité d'entrée entraînant une faible erreur de réglage.

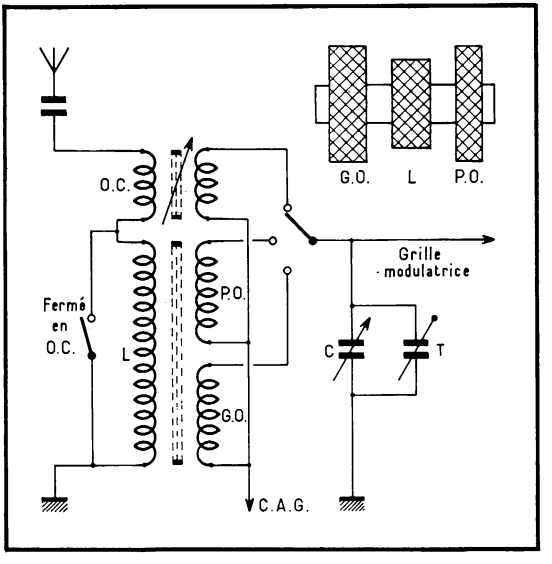


Fig. 7 - 25. — Schéma simplifié en entrée.

Les bobinages de chacune des gammes et pour chacune des fonctions sont réalisés sur des mandrins séparés. Ils ont les caractéristiques approximatives suivantes :

En O.C.

Antenne : secondaire 1,2 µH, quelques spires de fil émaillé 0,40 à 0,80 mm sur un support plastique avec vis en fer H.F. ; primaire : 4 à 5 spires de fil émail soie 0,1 mm bobinées sur le secondaire.

Oscillateur : enroulement accordé 1 µH, quelques spires de fil émaillé 0,40 à 0,80 mm sur support plastique avec vis en fer H.F. ; enroulement d'entretien, 8 à 10 spires de fil émail soie de 0,10 mm bobinées sur l'enroulement accordé.

En P.O.

Antenne : secondaire environ 180 à 200 µH en nid d'abeilles, fil divisé 10 × 0,05 mm sur le même type de support qu'en O.C. ; primaire haute impédance environ 2 000 µH en nid d'abeilles, généralement en fil plein émail soie 0,10 mm.

Oscillateur : enroulement accordé environ 100 µH en nid d'abeilles, fil émail soie 0,10 mm ; enroulement d'entretien, environ 10 spires.

En G.O.

Antenne : secondaire environ 2 200 µH en fil émail soie 0,10 mm ; primaire généralement à basse impédance (à ce moment ce bobinage a les mêmes caractéristiques que le primaire P.O.).

Oscillateur : enroulement accordé environ 450 µH fil émail soie 0,10 mm ; entretien : 20 à 30 spires de fil émail soie de 0,10 mm sur l'enroulement accordé.

Les trimmers sont des condensateurs ajustables de 30 pF. Si cette valeur n'est pas suffisante en G.O., il faut souder un condensateur fixe de 50 pF aux bornes du trimmer.

Le padding P.O. a une valeur d'environ 450 pF, le padding G.O. est d'environ 150 pF.

Toutes ces valeurs sont données pour un condensateur variable double de 490 pF.

Ce schéma peut être simplifié en entrée selon la figure 7 - 25. Ici, le primaire à haute impédance en P.O. et à basse impédance en G.O. est constitué par une même bobine L non commutée. Le primaire O.C. en série n'a aucune influence en P.O. et en G.O. Un seul contact court-circuite L en position O.C.

Le trimmer séparé sur chacune des gammes est remplacé par un trimmer unique placé sur le condensateur variable. Il doit être réglé en P.O. sur 1 400 kHz.

Le constructeur prérègle les bobines O.C. et G.O. pour obtenir une commande unique satisfaisante.

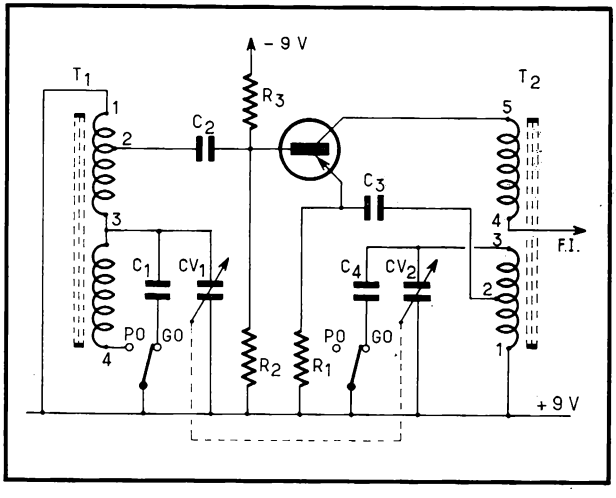


Fig. 7 - 26. — Schéma P.O. - G.O. à transistors.

Le bobinage est réalisé en mettant la bobine L entre les enroulements accordés P.O. et G.O.

5.5.2. — *LES RÉCEPTEURS A TRANSISTORS.*

La figure 7 - 26 donne un schéma simple, souvent utilisé dans les récepteurs à transistors P.O. - G.O.

Le cadre de réception comprend deux enroulements qui sont branchés en parallèle en P.O. Ainsi la valeur de self-induction est correcte, mais la longueur du fil est grande ; elle est répartie sur la moitié du bâtonnet de ferrite

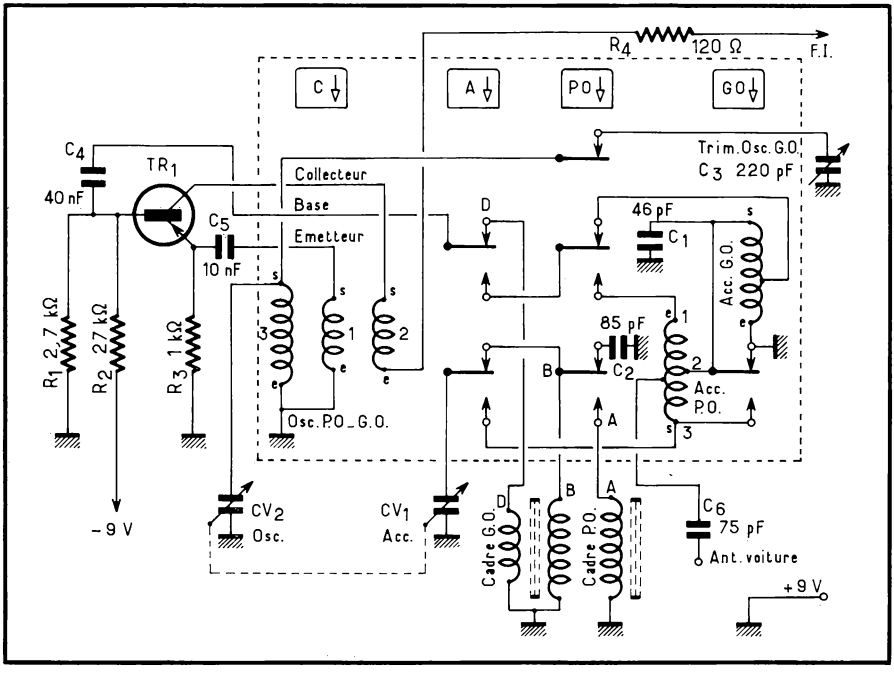


Fig. 7 - 27. — Schéma P.O.-G.O. avec commutation antenne-cadre par touches (Oréga).

captant une énergie H.F. plus importante. En G.O. le circuit accordé comprend le bobinage entre 1 et 3 associé au condensateur variable CV1 et au trimmer fixe C_1. Le bobinage 3-4, « en l'air » pour l'accord, participe à la captation H.F.

Le circuit oscillateur ne comporte pas de commutation de bobinages. Le calcul est fait pour les P.O. avec L grand et CV2 petit. Ainsi, pour les G.O., il suffit de brancher C_4 en parallèle sur CV2 pour obtenir une valeur correcte. La valeur de CV2 est calculée pour pouvoir réaliser la commande unique sans padding.

Ainsi, la commutation se résume à deux contacts qui doivent être fermés en G.O.

Le condensateur variable est normalisé : CV1 = 280 pF, CV2 = 120 pF.

La figure 7 - 27 se rapporte à un bloc de bobinages à commutation par touches. Il reçoit les gammes P.O. et G.O. sur cadre et sur antenne avec commutation des bobinages.

La touche cadre (C) est liée mécaniquement à la touche antenne (A), elle ne possède pas de contacts électriques. En appuyant sur C on libère A et on établit les contacts supérieurs représentés sous la touche A ; il s'agit de deux inversions.

La touche P.O. est solidaire de la touche G.O. ; il ne peut y en avoir qu'une d'enfoncée. La touche P.O. commande trois inversions, tandis que la touche G.O. n'en commande qu'une.

Le cadre ferrite reçoit trois bobinages. L'enroulement D est toujours relié à la base du transistor, que ce soit en P.O. ou en G.O. En P.O. les enroulements B et A sont en parallèle. En G.O. seul l'enroulement B est relié, le trimmer C_2 est branché aux bornes de CV1.

Les bobinages d'antenne sont prévus pour être branchés sur une antenne voiture, ils sont du type autotransformateur.

L'oscillateur local est conforme au schéma précédent. Tous les organes entourés par un pointillé sont contenus dans le bloc de bobinages.

5.6. — Le réglage de la commande unique.

Il a été question, au cours des paragraphes précédents, de commande unique entre le condensateur d'accord et le condensateur oscillateur. Il est nécessaire d'exposer le principe de ce réglage en trois points.

On sait que la fréquence antenne F_A et la fréquence locale F_o donnent, par battement, la fréquence intermédiaire FI.

$$FI = F_o - F_A$$

La valeur de la F.I. est normalisée à 455 kHz ou à 480 kHz. Il faut donc

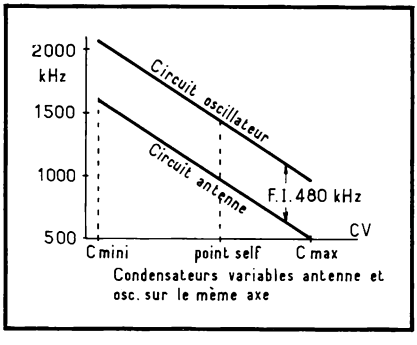


Fig. 7 - 28. — Courbe théorique des circuits antenne et oscillation locale pour obtenir une fréquence intermédiaire constante (gamme P.O.).

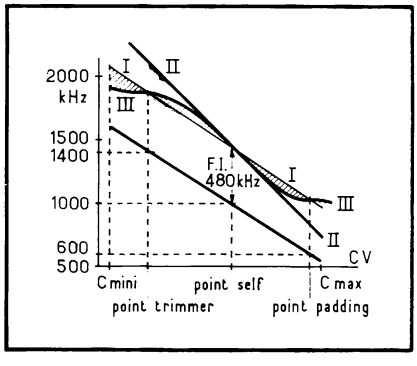


Fig. 7 - 29. — Réglage en trois points de la commande unique.

que tout au long des gammes à recevoir la différence entre F_o et F_A soit constante et égale à F.I. (fig. 7 - 28).

On commence par calculer les bobinages de façon à avoir cette différence de fréquence pour une même capacité d'accord des deux circuits au milieu de la plage à couvrir, c'est-à-dire vers 1 000 kHz en P.O. C'est le premier des trois points de réglage appelé « point self ». Le bobinage oscillateur a une self-induction plus faible que le bobinage d'antenne puisque, accordé par une même valeur de capacité, il doit donner une fréquence plus élevée de 480 kHz.

Si l'on parcourt la plage ainsi on s'aperçoit que la différence de 480 kHz n'est pas maintenue. Sur la figure 7 - 29, la courbe du circuit oscillateur I est la courbe théorique de la figure précédente. Après le calcul des bobinages on obtient la courbe II. La différence de fréquence est trop grande vers les fréquences élevées et trop petite vers les fréquences basses de la plage à recevoir.

Il faut agir sur la variation de capacité du condensateur oscillateur. En mettant un condensateur en parallèle sur celui-ci, on augmente la capacité minimale et on réduit la fréquence du circuit. Ce condensateur est réglé vers 1 400 kHz, c'est le point « trimmer » qui permet d'obtenir une différence de fréquence correcte.

Le troisième point de réglage est le point « padding » qui consiste à mettre un condensateur en série avec le condensateur variable oscillateur. Ainsi on diminue la capacité totale et on augmente la fréquence du circuit.

On obtient finalement la courbe III qui recoupe la courbe théorique I en trois points : point self par construction des bobinages, point trimmer (condensateur en parallèle) et point padding (condensateur en série).

Si les bobinages, la courbe du condensateur variable, la valeur des points de réglage et la valeur des capacités additionnelles sont bien étudiés, les déréglages sont faibles. Ils correspondent aux zones hachurées. Leur surface doit être réduite afin d'avoir toujours une différence de fréquence très voisine de la valeur de la fréquence intermédiaire.

5.7. — Les étages à fréquence intermédiaire.

5.7.1. — *SCHÉMA A TUBES.*

La figure 7 - 30 représente un schéma classique. Le premier transformateur est placé entre l'anode du tube changeur de fréquence et la grille du tube F.I.

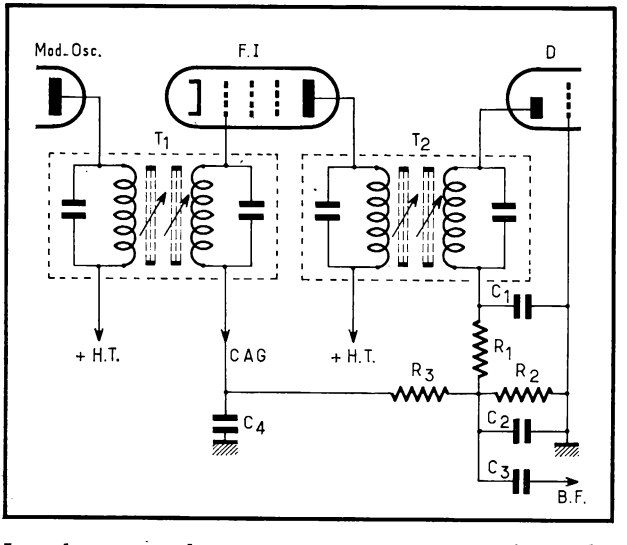


Fig. 7 - 30. — Schéma d'un amplificateur à fréquence intermédiaire à tubes.

Les deux enroulements ne sont pas amortis car la résistance interne ou la résistance d'entrée de ces tubes est supérieure à 1 MΩ. On peut donc tirer parti d'un coefficient de surtension élevé. Le premier transformateur est prépondérant au point de vue sélectivité du récepteur.

Il comprend deux circuits accordés sur la même fréquence (F.I.). La courbe de réponse de ce filtre de bande est fonction du couplage des bobines (fig. 7 - 31).

Un circuit F.I. devrait transmettre fidèlement la modulation B.F. superposée au signal H.F., puis couper immédiatement toutes les autres fréquences

qui sont indésirables. Comme sur les plages de radiodiffusion les stations sont espacées de 9 kHz, la modulation doit être limitée à 4,5 kHz ; car les bandes latérales sont à ± 4,5 kHz, soit 9 kHz au total. Evidemment il ne peut être question de haute fidélité en modulation d'amplitude à cause de l'encombrement des bandes réservées à la radiodiffusion.

La courbe idéale est figurée en I.

En faisant varier le couplage des deux circuits du transformateur F.I. on relève des courbes très différentes. Pour un couplage lâche (II) la courbe est très pointue, mais le gain est faible. Puis, la courbe s'élargit, le gain augmente jusqu'à une certaine valeur. On appelle le couplage correspondant « cou-

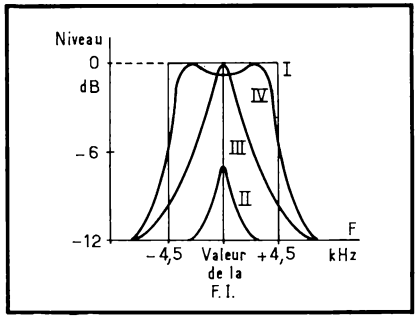


Fig. 7 - 31. — Courbes de sélectivité d'un filtre de bande en fonction du couplage des bobines.

plage critique » (III). Si on continue à resserrer le couplage le gain n'augmente plus et la courbe s'élargit faisant apparaître deux bosses (IV). Elle se rapproche de la courbe idéale, c'est celle qui est choisie pour le premier transformateur F.I. Si le coefficient de surtension est élevé les flancs de la courbe sont raides, la sélectivité et la reproduction B.F. du récepteur sont bonnes.

Pour cela il faut que les circuits accordés aient une impédance élevée. En effet, pour obtenir une fréquence déterminée, on peut choisir L grand et C petit, ou l'inverse. Dans le premier cas l'enroulement est plus coûteux, et la surtension est plus élevée.

C'est pourquoi ces bobines sont faites en fil divisé 20 × 0,05 ou, mieux, 30 × 0,05 mm sur des noyaux en fer H.F. ou même en ferrite. Un bon transformateur a des bobines de 650 µH avec une capacité d'accord inférieure à 200 pF. L'impédance est de 0,4 MΩ par circuit et le coefficient de surtension atteint 300.

Le second transformateur F.I. (T 2) n'est pas non plus amorti au primaire, mais il n'en est pas de même au secondaire. En effet, lorsque la diode de détection est positive, l'espace anode-cathode est conducteur et le circuit se referme par la résistance de détection R_2.

Or R_2 ne peut pas être d'une valeur très élevée car on observe alors une distorsion de la modulation B.F. Pour une bonne qualité musicale on adopte une valeur de 250 kΩ pour la résistance de détection. On démontre que l'amortissement du secondaire est égal à la moitié de la résistance de détection, soit 125 kΩ. Cette résistance est faible devant l'impédance du circuit ; le gain de l'étage est réduit et la courbe de sélectivité est aplatie. Pour remédier en partie à cet amortissement, on augmente un peu le couplage qui passe de 1,2 à 1,4.

Sur le schéma de la figure 7 - 30, R_1 - C_1 constitue un filtre éliminant la F.I. et ne laissant que la composante B.F. ($R_1 \approx 47$ kΩ, $C_1 \approx 200$ pF), R_3 est le

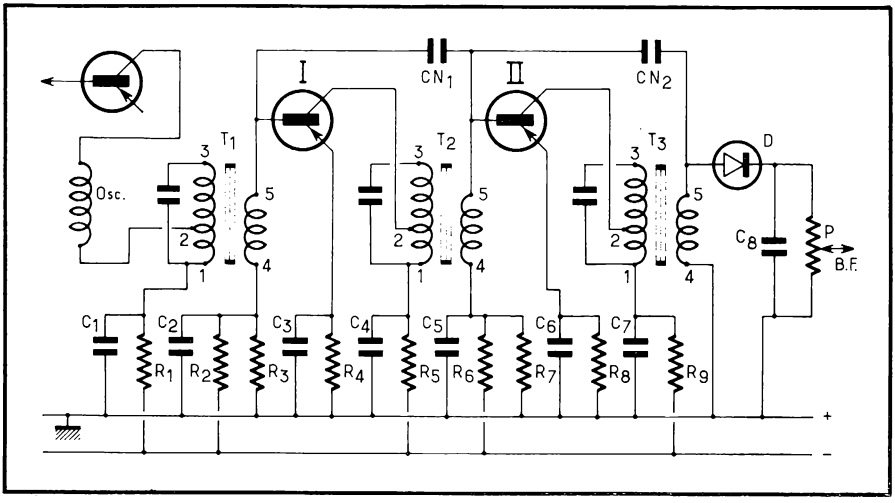


Fig. 7 - 32. — Etages à fréquence intermédiaire pour transistors avec un seul circuit accordé et neutrodynage.

filtre de C.A.G. découplé par C_4 (0,1 µF) ne laissant subsister qu'une tension négative proportionnelle au signal d'entrée, C_2 est le condensateur de détection (200 pF) et C_3 est le condensateur de liaison B.F. (0,01 à 0,1 µF).

5.7.2. — *SCHÉMAS A TRANSISTORS.*

Deux schémas de base peuvent être adoptés, soit avec un seul circuit accordé, soit avec deux circuits accordés.

Le schéma avec un circuit accordé est donné par la figure 7 - 32. On prévoit deux étages, au lieu d'un avec les tubes, à cause de la plus faible amplification des transistors.

Les transistors sont des éléments comparables aux tubes triode. Par conséquent la capacité grille-anode ou base-collecteur est relativement importante car aucun écran ne vient séparer les électrodes. Il y a réinjection de la tension de sortie vers le circuit d'entrée. Il faut compenser cette capacité parasite par un condensateur qui réinjecte vers l'entrée une tension égale et en opposition de phase ; c'est le procédé classique du *neutrodynage*. Lorsque le gain des étages F.I. est élevé, le risque d'instabilité augmente et il est indispensable de neutrodyner. La capacité parasite étant beaucoup plus faible avec les transistors fabriqués selon les techniques nouvelles, le neutrodynage est devenu moins critique. Les condensateurs de neutrodynage CN_1 et CN_2 sont placés entre les bases de deux étages successifs. Leur valeur est comprise entre 10 et 47 pF selon les types de transistors. Pour obtenir le gain maximal de chacun des étages il faut ajuster cette valeur avec précision.

Dans les montages à transistors les impédances chargeant les bobinages sont beaucoup plus faibles qu'avec les tubes.

Les transistors modernes ont, à 455 ou à 480 kHz, les caractéristiques suivantes :

Résistance d'entrée : 1 à 1,5 kΩ.
Capacité d'entrée : 240 pF.
Résistance de sortie : 1 MΩ.
Capacité de sortie : 3 à 5 pF.

On voit que le secondaire est très amorti par la faible résistance d'entrée. Le primaire par contre peut avoir une courbe de sélectivité et un facteur de surtension normaux par suite de la résistance de sortie élevée du transistor.

Le schéma de la figure 7 - 32 découle de ces observations. Chacun des boîtiers F.I. est composé d'un enroulement accordé au primaire avec une prise intermédiaire afin de bénéficier de l'impédance de charge fictive la plus élevée possible. Le secondaire est un simple enroulement de liaison qui transmet plutôt un courant qu'une tension à la base. Il faut se souvenir qu'un transistor est un amplificateur de courant pour comprendre l'avantage de cette liaison. Ces enroulements sont bobinés dans un pot fermé en fer H.F. ou en ferrite de façon à bénéficier de la perméabilité effective la plus élevée possible, compte tenu du courant continu superposé à la composante alternative.

Le réglage s'obtient par une vis en fer H.F.

A titre d'exemple, voici les caractéristiques des trois boîtiers montés dans des pots fermés miniatures *Cofidis* (fig. 7 - 5) :

Boîtiers	T 1			T 2			T 3		
Repères	1-2	1-3	4-5	1-2	1-3	4-5	1-2	1-3	4-5
Nombre de spires	48	130	4	50	140	8	45	140	25
Nature du fil ...	0,15 émail			0,15 émail			divisé 7 × 0,05		
Surtension à vide	90			90			120		

On remarque que le secondaire de T3 comporte un plus grand nombre de spires pour mieux s'adapter à la diode de détection.

La capacité d'accord du primaire est de 250 pF.

Les autres valeurs sont classiques : les condensateurs C_1 à C_8 assurent le découplage des électrodes (environ 0,1 μF). La valeur des résistances dépend des types de transistors employés. P est le potentiomètre de volume d'environ 10 kΩ.

Le schéma de la figure 7 - 33 est plus complet, car les deux circuits F.I. sont accordés, une diode d'amortissement et un C.A.G. améliorent les performances.

Les deux circuits accordés sont réglés au couplage critique, ils comportent une prise au primaire et une au secondaire de façon à réduire l'amortissement dans toute la mesure du possible. Ils doivent être bobinés dans deux pots fermés placés côte à côte dans le même blindage. On obtient ainsi une bande passante plus large à 3 dB et une sélectivité meilleure au-dessus de 6 dB. La courbe est moins pointue, donc la reproduction musicale est meilleure.

Le C.A.G. est obtenu en prélevant une certaine puissance à la détection. La tension B.F. est filtrée avant d'être appliquée à la base du premier transistor F.I. Cette commande automatique ne peut pas être transmise à la base de

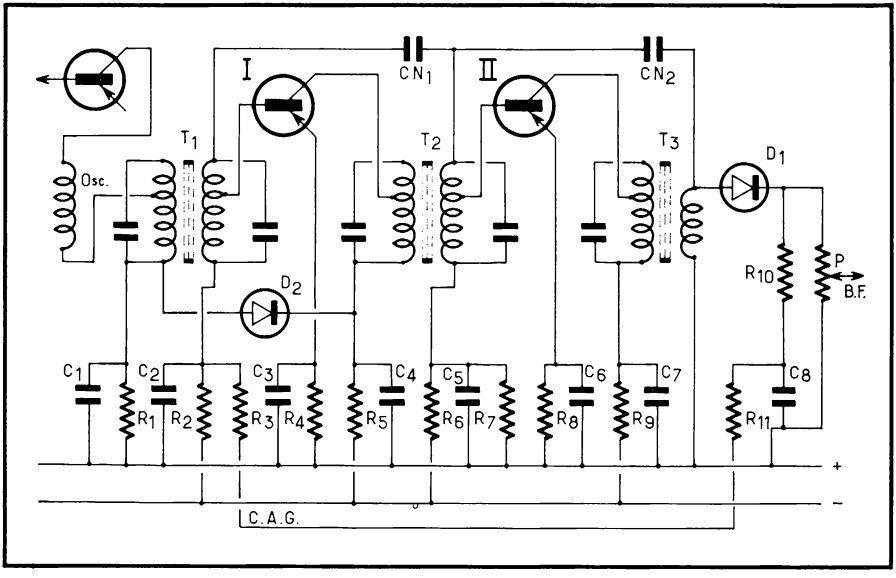


Fig. 7 - 33. — Etages à fréquence intermédiaire pour transistors avec deux circuits accordés, C.A.G. et diode d'amortissement.

l'oscillateur-mélangeur car on risque de le faire « glisser ou décrocher ». Il n'est pas non plus toujours possible de l'appliquer au deuxième étage F.I. qui risque d'atteindre la saturation.

La diminution du gain provoquée par le C.A.G. a pour effet de diminuer les capacités et d'augmenter les résistances d'entrée et de sortie. Ceci a pour conséquence la modification de la courbe de réponse des étages F.I. Pour remédier à cet inconvénient on dispose une diode d'amortissement en parallèle sur l'étage d'entrée F.I. Elle renforce l'action du C.A.G., évite la saturation de l'étage aux niveaux élevés et assure sa stabilité.

Les autres circuits du schéma de la figure 7 - 33 ne sont pas modifiés par rapport au montage précédent.

6. — LES BOBINAGES POUR RÉCEPTEURS GRAND PUBLIC A MODULATION DE FRÉQUENCE.

6.1. — Généralités.

Les stations modulées en fréquence émettent dans la bande II, c'est-à-dire entre 87,5 et 100 MHz en France, jusqu'à 104 MHz en Allemagne, et 108 MHz dans certains pays.

Le schéma classique d'un récepteur superhétérodyne doit être modifié pour tenir compte des fréquences élevées utilisées et de la technique particulière à la modulation de fréquence (fig. 7 - 34).

L'antenne ou le cadre sont ici remplacés par un doublet accordé sur la fréquence médiane de la plage à recevoir. Etant donné sa faible sélectivité propre, le gain est pratiquement constant pour toute la bande II. Le doublet peut être extérieur, ou intérieur dans le coffret du récepteur. Pour les appareils à transistors il est constitué par une ou deux antennes télescopiques de longueur appropriée. Les antennes extérieures doivent satisfaire à la spécification F.N.I.E. 010 (1959).

L'étage H.F. est indispensable pour plusieurs raisons. Le récepteur doit satisfaire aux règles de normalisation qui imposent un rayonnement faible de l'oscillateur local dans l'antenne, afin de ne pas gêner les autres utilisateurs de récepteurs A.M. - F.M. et télévision (44 dB au-dessous de 1 mW, soit environ 100 nW).

L'étage H.F. sert donc pour amplifier le signal et permettre que le changement de fréquence s'opère dans les meilleures conditions. Il constitue également une séparation efficace entre l'oscillateur local et l'antenne réduisant le rayonnement parasite.

Etant donné les fréquences élevées de cette bande les bobinages sont très simples. Les bobinages d'antenne, de liaison et d'oscillation locale sont réalisés sur des petits mandrins en plastique réglables par une vis en fer H.F. prévue

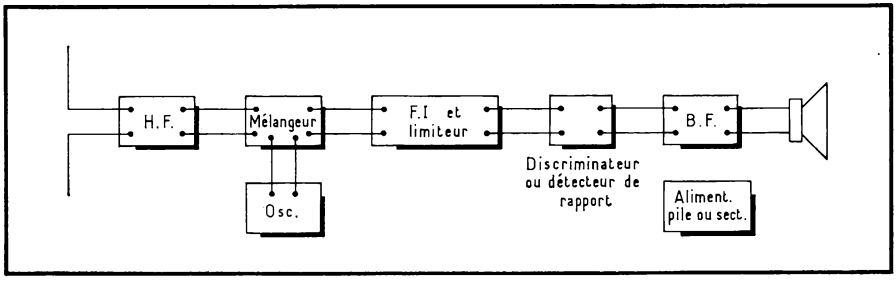


Fig. 7 - 34. — Bloc diagramme d'un récepteur à modulation de fréquence.

pour 100 MHz. Le fil est en cuivre argenté d'environ 1 mm bobiné à spires espacées de 1 mm. Le primaire et le secondaire sont bobinés à la suite l'un de l'autre. Pour un mandrin de 8 mm de diamètre, les enroulements comprennent entre 2 et 4 spires.

Des exemples seront donnés au cours du paragraphe suivant.

Pour le changement de fréquence on préfère le montage à conversion additive, c'est-à-dire que l'on emploie, soit un tube triode, soit un transistor. L'explication du fonctionnement de ce schéma a été donné au paragraphe précédent.

La valeur de la fréquence intermédiaire ne peut plus être de 455 ou 480 kHz. Comme la fréquence incidente est plus élevée, il faut choisir une fréquence F.I. en rapport. Il a été normalisé 6,75 MHz et 10,7 MHz. C'est cette dernière valeur qui est la plus répandue.

Les bobinages F.I. sont fabriqués sur des mandrins en plastique ou en fer H.F. comportant une vis de réglage. Le fil est émaillé, son diamètre est compris

entre 0,20 et 0,30 mm. Sur un mandrin de 6 mm, les enroulements primaire et secondaire ont environ 25 spires jointives.

Afin de bénéficier de la propriété anti-parasite de la modulation de fréquence, les étages F.I. doivent avoir un effet limiteur qui élimine tout ce qui est modulé en amplitude.

La détection F.M. est très différente de celle utilisée en A.M. On rencontre deux schémas de base : le discriminateur Foster-Seeley (fig. 7 - 35) et le détecteur de rapport (fig. 7 - 36).

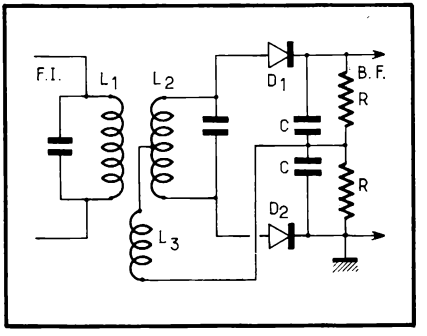


Fig. 7 - 35 (Ci-contre). — Détection F.M. par le discriminateur Foster-Seeley.

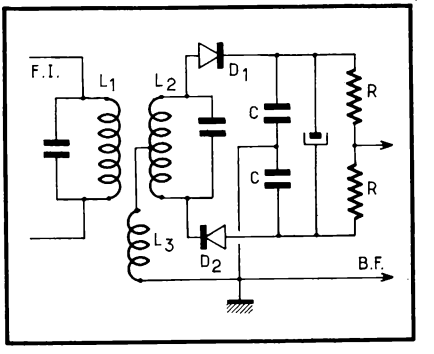


Fig. 7 - 36 (Ci-contre). — Détection F.M. par détecteur de rapport.

Le schéma peut être prévu avec des tubes ou avec des diodes à pointe au germanium sans modifications. Les bobinages sont les mêmes pour les deux schémas. Ils sont comparables aux circuits F.I. en ce qui concerne L_1 et L_2. Ils comportent en plus un enroulement L_3 de quelques spires. Il est indispensable que les deux moitiés de L_2 soient bien symétriques ; on les bobine généralement en bifilaire en partant du centre.

On préfère généralement le détecteur de rapport qui a un effet limiteur très net et qui vient renforcer l'action anti-parasite.

Les réglages doivent être effectués avec précision afin que la courbe du discriminateur soit bien linéaire permettant une détection sans distorsion.

Il est bon de se souvenir que la largeur de bande à la détection doit être d'au moins 250 kHz. L'excursion en fréquence de la modulation est de $\pm$ 75 kHz.

Afin de bien transmettre les fréquences élevées du spectre sonore elles sont suramplifiées à l'émission. On dit qu'elles ont été préaccentuées de 50 µs. Après la détection il faut prévoir un filtre de 50 µs de constante de temps (47 kΩ et 1 nF) pour réduire l'amplification des aiguës et avoir une courbe de réponse B.F. linéaire.

Les récepteurs F.M. seuls sont rares. La très grande majorité des appareils permet la réception de toutes les gammes aussi bien A.M. que F.M. Leur diagramme schématique devient celui de la figure 7 - 37.

Les circuits d'entrée sont séparés par suite des fréquences très différentes à recevoir. On trouve le bloc clavier A.M. qui comporte les circuits habituels et une touche supplémentaire F.M. assurant les commutations indiquées, ainsi que celles de l'alimentation qui ne sont pas figurées. Les circuits d'entrée A.M. ne sont pas modifiés.

Par contre, les étages F.I. doivent être mixtes et amplifier un signal soit sur 455 ou 480 kHz, soit sur 10,7 ou 6,75 MHz. Il ne peut être question de commuter tous les circuits aux bornes des tubes ou des transistors, car la complication du schéma entraînerait des pertes et des risques d'accrochage difficiles à maîtriser.

On place donc en série et sans commutation les deux boîtiers F.I.-F.M. et F.I.-A.M. En A.M., les quelques spires du bobinage F.M. sont sans importance. En F.M., la forte inductance des enroulements A.M. agit comme une bobine d'arrêt. Il faut donc placer aux bornes du tube ou du transistor d'abord le boîtier F.M. et ensuite l'élément A.M.

Les boîtiers par eux-mêmes ne subissent pas de modifications, on place côte à côte sous leur blindage individuel les deux transformateurs.

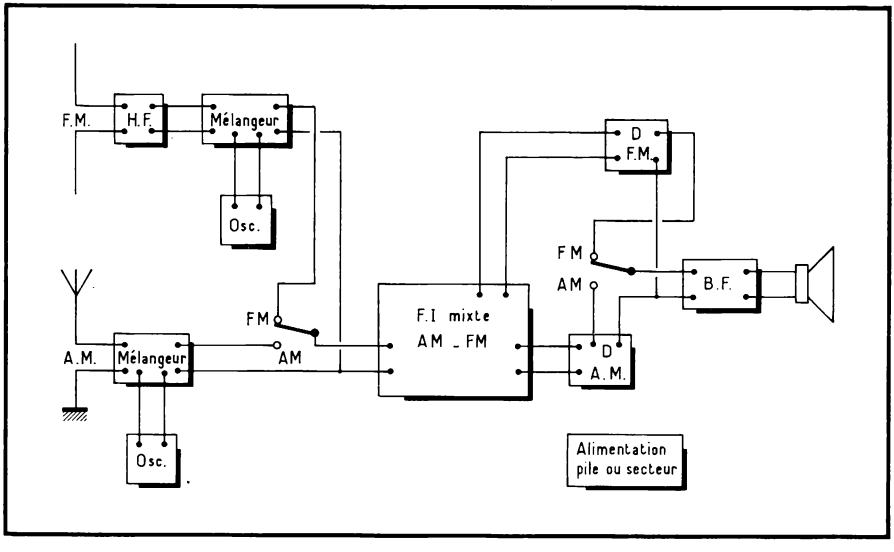


Fig. 7 - 37. — Bloc diagramme théorique d'un récepteur mixte AM-FM.

On constate, dans la pratique, qu'il faut une amplification F.I. plus importante en F.M. qu'en A.M. afin de pouvoir recevoir aisément les principales stations. Pour éviter l'emploi d'un tube ou d'un transistor supplémentaire, on adopte une commutation différente. Le bloc diagramme devient celui de la figure 7 - 38. En F.M., on supprime l'organe mélangeur-oscillateur A.M. en entrée, et on le reporte dans l'ensemble F.I. mixte. Ainsi, ce tube ou ce transistor constitue l'étage supplémentaire F.I. désiré. En A.M., il assure le changement de fréquence normal.

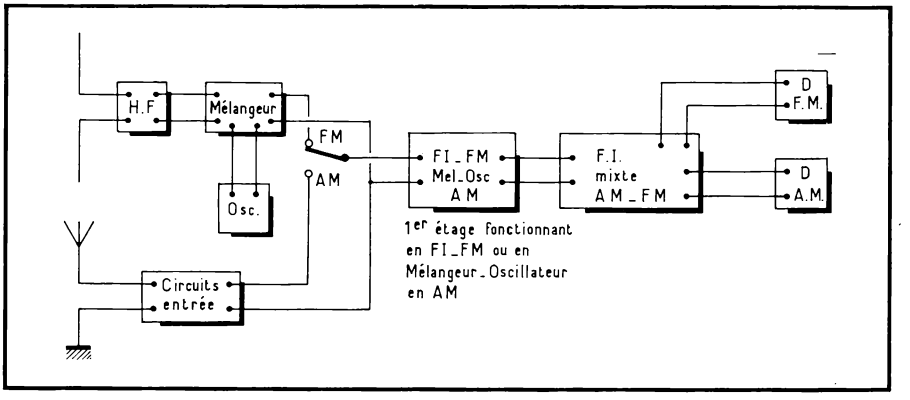


Fig. 7 - 38. — Bloc diagramme pratique d'un récepteur AM-FM (partie H.F. seulement).

6.2. — Les schémas à tubes.

La figure 7 - 39 donne en exemple le schéma complet d'un appareil mixte A.M.-F.M. à tubes, le récepteur R M 317 *Ducretet-Thomson.*

Le dipôle intérieur au meuble est relié aux bornes de S1 qui reçoit également grâce à une prise médiane l'énergie H.F. de l'antenne extérieure éventuelle. Le bloc F.M. est classique. L'amplification H.F. est assurée par la première triode de L1. Le circuit S2 est accordé sur la fréquence médiane de la plage à recevoir.

Le circuit H.F. accordé est inséré dans l'anode de L1. Le second élément triode assure la conversion additive grâce à S3 et à S4. La fréquence intermédiaire (10,7 MHz) est recueillie par S5. La bobine S6 donne un couplage supplémentaire.

La réception A.M. est assurée sur cadre ou sur antenne pour les gammes P.O. et G.O. En O.C. la réception de l'énergie H.F. se fait par l'intermédiaire du dipôle F.M. ou d'une antenne extérieure.

Le tube L2 (triode-hexode) sert d'oscillateur-mélangeur en A.M. et d'amplificateur F.I. en F.M. ; à ce moment l'élément triode n'est pas utilisé.

L'ensemble des bobinages F.I.1 comprend d'abord les circuits F.M. accordés au primaire par un condensateur de 5 pF, puis les circuits A.M. (C_{31} : 160 pF).

Le tube L3 assure l'amplification F.I. et la détection A.M.

Le boîtier F.I.2 comprend le détecteur de rapport légèrement modifié et le bobinage classique F.M.

Ce sont deux diodes au germanium D1 et D2 qui détectent les signaux F.M.

Les circuits de contrôle automatique de gain (C.A.G.) sont doubles en A.M. et en F.M. En A.M. la tension de contrôle est prise aux bornes de R_{21}, filtrée par R_{17} et C_{38} pour L3 et par R_{19}, C_{29} pour L2 et pour L1. En F.M., une tension est prise aux bornes de D1. Ces tensions sont appliquées sur la grille de l'indi-

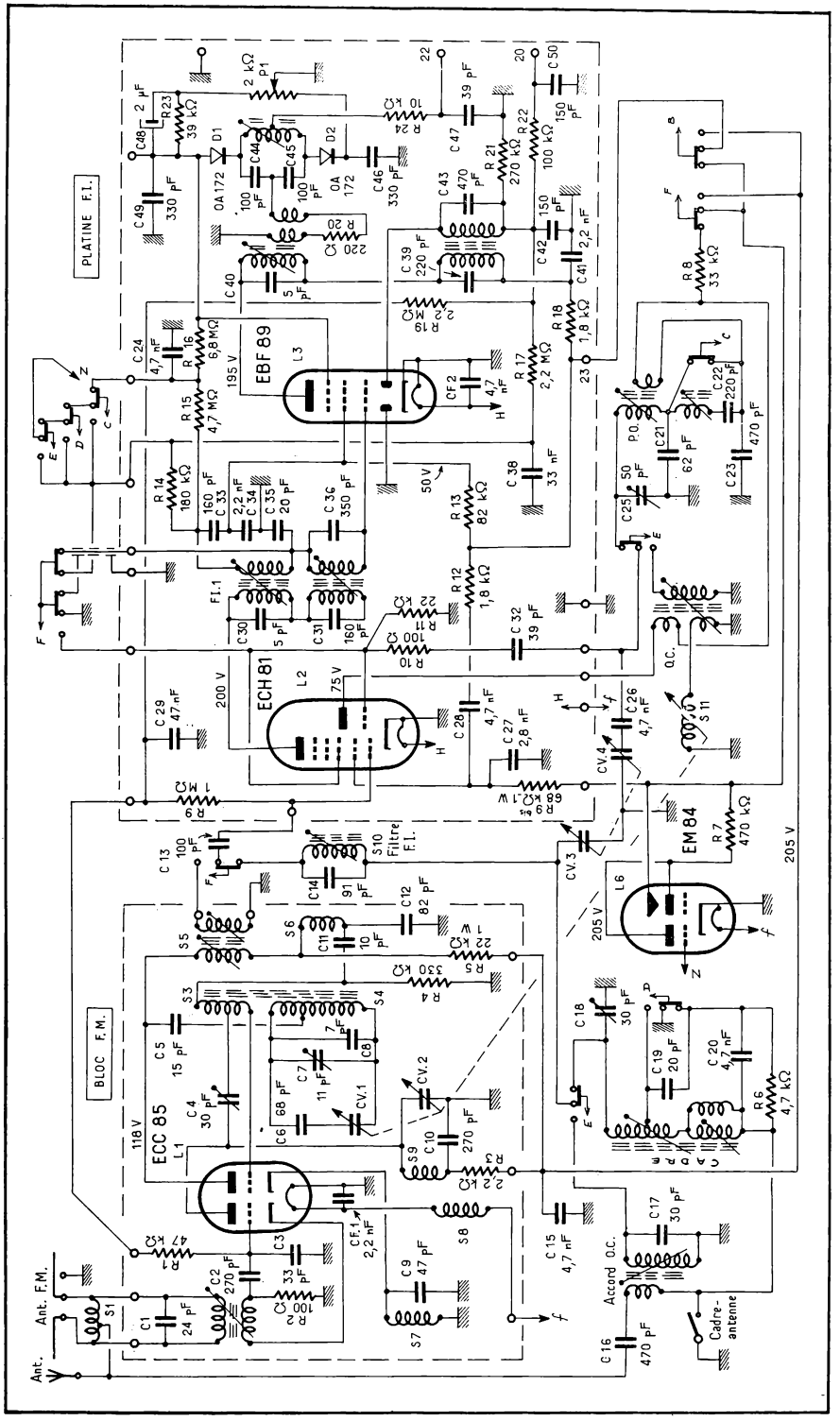
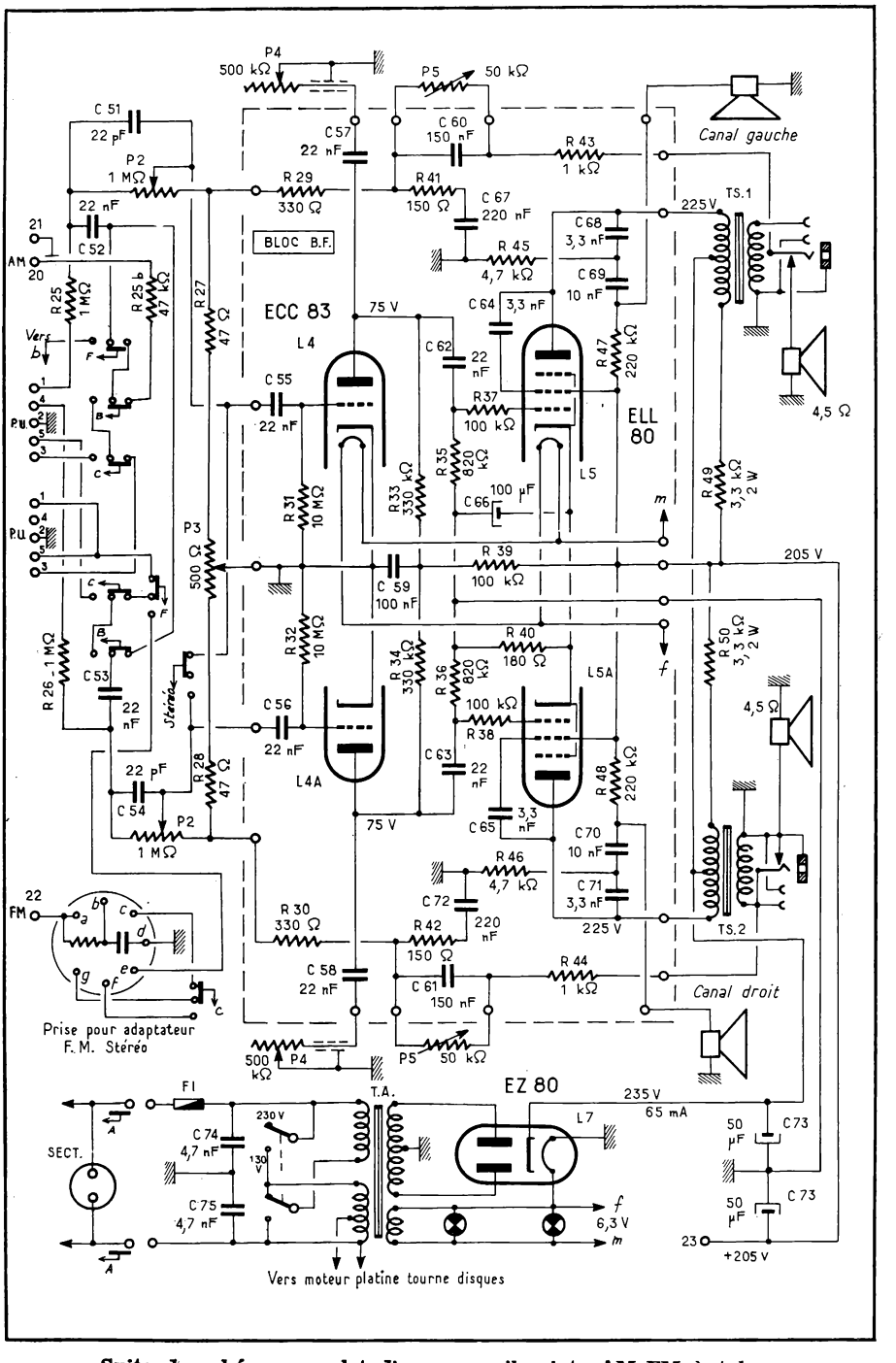


Fig. 7 - 39. — Schéma complet d'un appareil mixte AM-FM à tubes (Ducrétet-Thomson) (1re partie)



Suite du schéma complet d'un appareil mixte AM-FM à tubes.

cateur visuel d'accord L6 grâce à la commutation Z, respectivement en A.M. et en F.M.

L'amplificateur B.F. est double de façon à permettre une reproduction stéréophonique des disques. De plus, un bouchon est prévu pour recevoir l'adaptateur multiplex F.M. pour la réception ultérieure des émissions stéréophoniques F.M. par un seul émetteur. (Voir *Toute la Stéréophonie*, du même auteur, chez le même éditeur.)

6.3. — Les schémas à transistors.

La figure 7 - 40 donne le schéma d'un récepteur F.M. seul, à titre d'exemple pour la réalisation des bobinages. Les lecteurs intéressés par ce schéma pourront se reporter à notre ouvrage sur les récepteurs à transistors (*Editions Radio*).

Réalisation des bobinages :

— Doublet de réception : impédance 75 Ω.

— L_1 : entrée H.F. bobine diamètre 8 mm, fil 1 mm cuivre argenté avec noyau en fer H.F. Entre 1-2 : 2 spires ; 2-3 : 2 spires ; 4-5 : 4 spires ; bobinage à spires espacées de 1 mm.

— L_2 : bobine accordée H.F. ; même bobine, même fil ; 3 spires espacées de 1 mm.

— L_3 : bobine entrée étage convertisseur ; même bobine, même fil ; entre 1-3 : 3 spires ; entre 2-3 : 2 spires, espacées de 1 mm.

— L_4 : bobine oscillatrice ; même bobine, même fil ; entre 1-3 : 3 spires ; entre 2-3 : 2 spires espacées de 1 mm.

— T1 à T4 : transformateurs F.I. accordés sur 10,7 MHz par une capacité fixe de 82 pF, sauf C_{22} = 47 pF (voir le tableau page suivante).

7. — LES BOBINAGES POUR LA TÉLÉVISION.

7.1. — Généralités.

Les émissions de télévision sont actuellement réparties sur les plages suivantes :

— bande I, de 40 à 68 MHz ;

— bande III, de 160 à 216 MHz ;

— bandes IV et V, de 470 à 860 MHz.

En France, la bande I est occupée par les canaux 2 et 4, la bande III par les canaux de 5 à 12 ; ils transmettent les émissions du premier programme sur l'ensemble du territoire.

Les émissions du second programme sont prévues avec un standard différent sur les bandes IV et V, canaux 21 à 69.

La réception des bandes I et III s'effectue au moyen d'un rotacteur contenant des barrettes préréglées sur les différents canaux. En revanche, pour les bandes IV et V il est prévu l'utilisation d'un tuner à réglage continu couvrant tous les canaux.

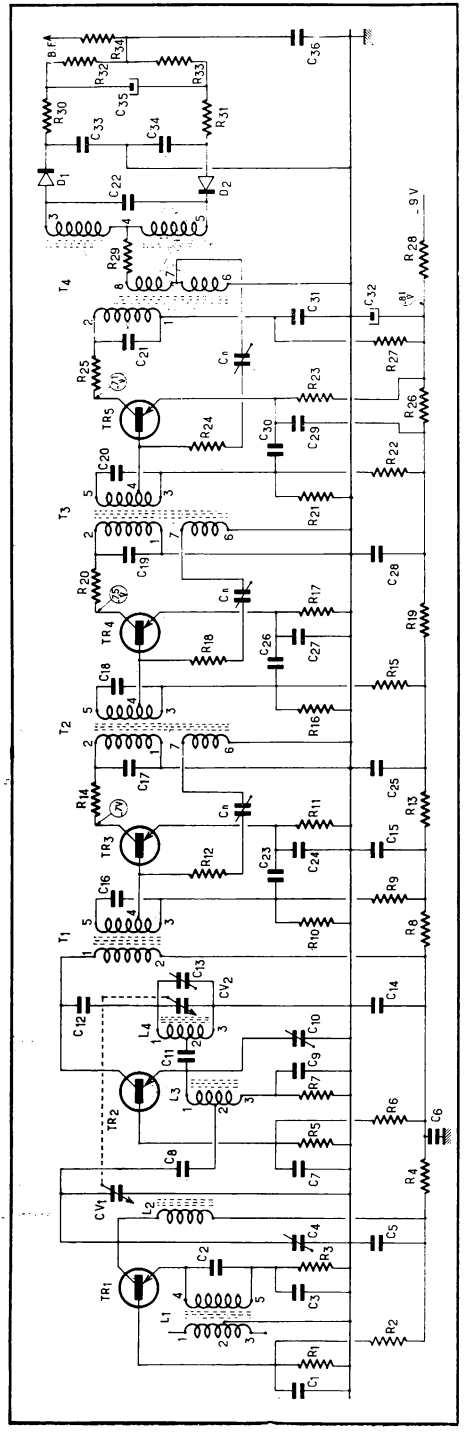


Fig. 7 - 40. — Schéma d'un récepteur F.M. à transistors (Cosem).

Détail des bobinages M.F. (F.I.) 10,7 MHz.

	T_1		T_2	T_3		T_4			
	1_2	3_5	3_4	1_2	3_5	3_4	6_7	1_2	6_8	6_7	3_5
Nombre de spires	25	25	1,75	25	25	1,75	5	25	11	5	2 x 12 bifilaire
Nature du fil. Email soudable	28/100			28/100				28/100			20/100
Surtension à vide	100	-	-	100	-	-	-	90	-	-	95
Nature du mandrin : Mat. moulée.	ø = 6 mm			ø = 6mm				ø = 6 mm			ø = 8 mm
Nature du noyau	Fer H.F.			Fer H.F.				Fer H.F.			
Entre axe des bobines	24 mm			24 mm				19 mm			
Blindage : Aluminium	42 x 20 x 25			42 x 20 x 25				42 x 20 x 25			

Les autres bobinages intéressants sont les transformateurs F.I. vision et son, le transformateur de sortie lignes, le déviateur et les transformateurs d'image et de filtre.

7.2. — Le rotacteur pour les bandes I et III.

Le rotacteur pris en exemple est le modèle *Transco*. Les circuits avec les tubes (fig. 7 - 41) sont câblés sur un châssis métallique. Les barrettes sont dans un rotacteur contenant 6 ou 12 canaux. En le tournant, on amène devant les contacts fixes la barrette correspondant au canal à recevoir. Elle contient les bobines L_1, L_2, L_4, L_5 et L_6.

L'entrée est assymétrique, son impédance de 75 Ω correspond à celle des antennes et du câble de descente utilisés en France.

L'amplification H.F. est assurée par deux triodes (ECC/PCC 189) montées en cascode, c'est-à-dire en série. Le neutrodynage de l'étage est réalisé par le condensateur ajustable C_n de quelques pF. L'étage H.F. est indispensable pour éviter le rayonnement de l'oscillateur local par l'antenne (normes U.T.E. C 92-200 et C 92-210). De plus, il réduit le bruit de fond d'entrée, améliore le changement de fréquence et la courbe de sélectivité globale.

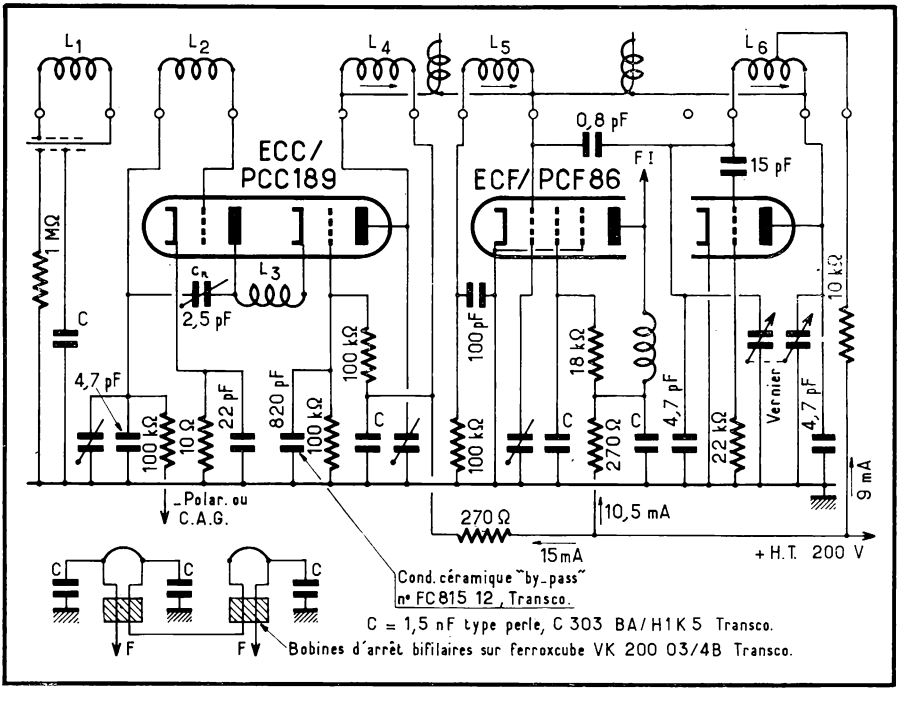


Fig. 7 - 41. — Schéma d'un rotacteur de télévision pour les bandes I et III (Transco).

A la suite du cascode, on rencontre un filtre de bande à deux circuits L_4 et L_5. Le couplage est réglé au moyen de la capacité formée par deux fils isolés torsadés ensemble sur une certaine longueur.

L'oscillateur du type Colpitts est accordé par la bobine L_6 à prise médiane branchée entre grille et anode de la partie triode du tube ECF/PCF 86. Le couplage avec la modulation est assuré également par deux fils torsadés formant capacité.

Le mélange s'effectue dans la partie pentode du même tube. La fréquence intermédiaire est recueillie sur l'anode et dirigée vers l'amplificateur F.I.

Le câblage doit être judicieusement réalisé et les découplages doivent être très soignés pour éviter des accrochages. Les découplages se font, soit au moyen de condensateurs céramique, soit au moyen de condensateurs de traversée (by-pass), soit enfin au moyen de perles de ferrite augmentant l'inductance du fil sur lequel est enfilé la perle.

Le tableau ci-après donne en exemple la réalisation de cinq barrettes prévues pour ce rotacteur.

7.3. — Le tuner pour les bandes IV et V.

Dans les bandes IV et V la gamme à couvrir est très étendue et ces fréquences sont très élevées : 860 MHz correspond à environ 0,4 m.

La self-induction des bobines d'accord doit être très faible, les capacités et les inductances parasites prennent une très grande importance. L'influence de

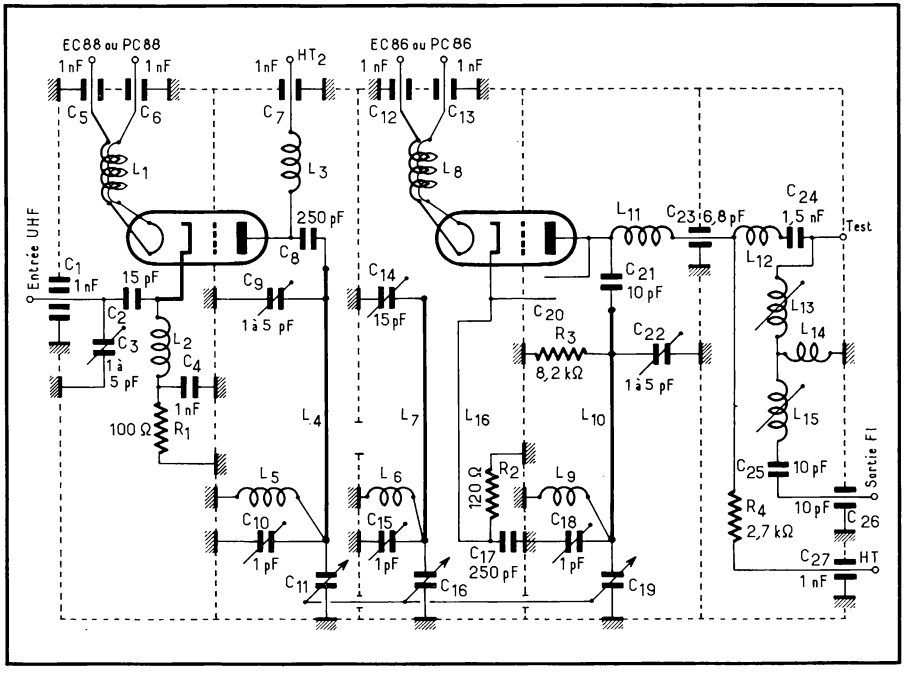


Fig. 7 - 42. — Schéma d'un tuner de télévision pour les bandes IV et V (Oréga).

RÉALISATION DE CINQ BARETTES PRÉVUES POUR LE ROTACTEUR TRANSCO

Canaux	F 2	F 6	F 8 A	F 10	F 12	
Fréquence «Son»	41,25	162,25	174,10	188,55	201,70	MHz
Fréquence « Vision »	52,40	173,40	185,25	199,70	212,85	MHz
Fréquence d'oscillation	80,40	201,40	213,25	227,70	240,85	MHz
L_1 (autour de L_2)	2	2	2	1 1/2	1 1/4	Nbre de spires
	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	∅ fil (ss chlorure de polyv.)
L_2	15 (1)	6	5 1/2	4	3 1/2	Nbre de spires
	20/100 2 c.s. jointives	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 1,5 mm	∅ fil pas
L_4	11 1/2 (2)	4	3	2 1/4	1 3/4	Nbre de spires
	20/100 2 c.s. jointives	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 2 mm	∅ fil pas
L_5	9 1/2 (3)	2 1/2	2	1 1/2	1	Nbre de spires
	20/100 2 c.s. jointives	6/10 étamé 2 mm	6/10 étamé 1,5 mm	6/10 étamé 2 mm	6/10 étamé —	∅ fil pas
L_6 (avec prise au milieu)	10	3 1/2	3	2	1 3/4	Nbre de spires
	45/100 émail jointives	6/10 étamé 2 mm	6/10 étamé 2,5 mm	6/10 étamé 2 mm	6/10 étamé 2 mm	∅ fil pas

(1) 10 kΩ en parallèle.
(2) 4,7 pF entre L_4 et L_5.
(3) 2,2 kΩ en parallèle.

Mandrin de 6 mm, noyaux laiton sauf pour L_1, L_2, L_4 et L_5, canal 2, noyaux en poudre de fer.

la disposition des organes est primordiale et la fabrication en série doit reproduire scrupuleusement le prototype. Il ne s'agit plus ici de bobines accordées mais de lignes maintenues au centre d'un compartiment métallique très rigide et indéformable.

Il ne peut être question de construire ou de dépanner un tuner sans un outillage très important et une bonne expérience de la question. Les caractéristiques des bobinages ne sont données que pour fixer les idées du lecteur.

Le schéma de la figure 7 - 42 montre le tuner *Oréga* pris en exemple. Les lignes en pointillés représentent les blindages entre les différents compartiments. Les organes sont disposés sur le schéma à leur emplacement réel.

Le boîtier est moulé d'une seule pièce en alliage léger, il constitue un châssis très rigide. Le couvercle est doublé d'une feuille de cuivre afin d'être certain du contact sans défaut avec le boîtier.

L'entrée est assymétrique, son impédance est de 75 Ω. La sortie F.I. est également prévue pour 75 Ω d'impédance, afin que la liaison entre le tuner et l'amplificateur F.I. se fasse par un câble coaxial blindé.

Le premier tube E C 88 amplifie le signal en H.F., il est monté selon le schéma « grille à la masse ». C'est la cathode qui reçoit le signal. L'anode est accordée par le condensateur variable C_{11} en série avec la ligne L_4. Elle est constituée par un fil en cuivre argenté de 1 mm.

Le couplage entre L_4 et L_7 est assuré par un orifice dans le blindage de surface et d'emplacement déterminés avec précision. L_7 est une ligne semblable à L_4 et accordée par le condensateur variable C_{16}. L'énergie H.F. est transmise à la cathode de la deuxième triode.

L'oscillateur local est monté dans l'anode du second tube. Il comprend le circuit accordé (L_{10} - C_{19}) et la capacité de réaction C_{20} formée réellement par deux fils rigides dont on règle la longueur et l'espacement.

Le dernier compartiment est réservé à la sortie F.I., sa valeur est de 32,70 MHz pour la vision et de 39,20 MHz pour le son.

Un démultiplicateur entraîne les trois condensateurs variables sur le même axe.

Les condensateurs ajustables placés aux deux extrémités des lignes permettent de « modeler » la courbe de réponse afin de lui donner la forme voulue et ce pour tous les canaux de la gamme. Les différents réglages sont très délicats.

Le tableau ci-après donne les caractéristiques des bobinages et des différentes pièces utilisées.

7.4. — L'amplificateur F. I.

La figure 7 - 43 donne le schéma de l'amplificateur F.I. vision et son du téléviseur *Radiotechnique*.

Il s'agit d'un ensemble donnant une sensibilité élevée pour des appareils « grande distance ». Le gain total en vision est de 3 600 au centre de la bande. Sa bande passante est de 10,4 MHz à 6 dB. Le centre de la bande est à 33 MHz.

— L'amplificateur vision F.I. comprend en entrée un filtre permettant de séparer le son de la vision. Le premier tube est à pente variable (E F 183) et

CARACTÉRISTIQUES DES PIÈCES DU TUNER ORÉGA

	Désignation des pièces		Désignation des pièces
	Inductances		Condensateurs
L_1	8 spires 20/100 en bifilaire	C_1	Condens. traversée 1 nF Ant.
L_2	3 spires 40/100	C_2	» 15 pF ± 10 %
L_3	10 spires 40/100	C_3	» ajustable 1 à 5 pF
L_4	Cuivre argenté 10/10	C_4	» 1 nF
L_5	5 spires 40/100	C_5	» »
L_6	» » »	C_6	» »
L_7	Cuivre argenté 12/10	C_7	» »
L_8	8 spires 20/100 en bifilaire	C_8	» 250 pF ± 20 %
L_9	5 spires 40/100	C_9	» ajustable 2 à 5 pF
L_{10}	Cuivre argenté 15/10	C_{10}	» » 1 pF
L_{11}	10 spires 40/100	C_{11}	Condensateur variable
L_{12}	13 » »	C_{12}	» 1 nF
L_{13}	4,5 spires 25/100	C_{13}	» »
L_{14}	13 spires 40/100	C_{14}	» ajustable 2 à 15 pF
L_{15}	18,5 spires 25/100	C_{15}	» » 1 pF
L_{16}	Cuivre argenté 12/10	C_{16}	Condensateur variable
		C_{17}	» 250 pF ± 20 %
		C_{18}	» ajustable 1 pF
		C_{19}	Condensateur variable
		C_{20}	Capacité de réaction
		C_{21}	Condens. 10 pF
	Résistances	C_{22}	» ajustable 1 à 5 pF
		C_{23}	» 6,8 pF ± 10 %
R_1	100 Ω 1/2 W ± 10 %	C_{24}	» 1,5 nF
R_2	120 Ω 1/2 W ± 10 %	C_{25}	» 10 pF ± 0,5 pF
R_3	8,2 kΩ 1/2 W ± 10 %	C_{26}	» 10 pF
R_4	2,7 kΩ 1 W ± 10 %	C_{27}	» 1 nF

son gain est réglé par la tension de C.A.G. Le premier circuit F.I. accordé (L_2) est réglé au couplage critique et amorti afin d'obtenir la largeur de bande voulue. Un réjecteur en T (L_3) réglable permet d'éliminer les interférences. Le second circuit accordé T1 est réglé au-delà du couplage critique afin d'obtenir deux bosses distinctes et un creux de 4 à 5 dB au milieu. Ce réglage permet d'élargir la courbe, tout en conservant pour l'ensemble une réponse absolument plate. Le troisième étage est réglé par T2 au couplage critique. La détection est assurée par une diode à pointe O A 70 donnant une large bande. Enfin, l'étage « vidéo » est corrigé au moyen des bobines L_4, L_5 et L_6. Ces corrections sont étudiées pour favoriser l'amplification de certaines fréquences et obtenir une courbe de réponse absolument plate.

— L'amplificateur son F.I. comprend deux étages à tubes E B F 89. Leur

réglage est effectué par les bobines L_7 et L_8. Ce sont des circuits résonnants simples. Les deux étages sont commandés par un C.A.G. distinct de celui de la vision. La tension de réglage est obtenue par une diode du second tube. La détection et l'amplification B.F. sont classiques.

La ligne d'alimentation haute tension est découplée entre chacun des étages par un bâtonnet de ferrite. Les filaments de leur côté sont découplés par une perle de ferrite.

Les caractéristiques des bobinages sont donnés sur le tableau ci-après :

Primaire	Secondaire	Fil, primaire et secondaire	Diamètre mandrin	Observations
T 1 24 + 9 de couplage	17	30/100 2 c.s.	6 mm	(1), (2)
T 2 25 + 8 de couplage	25	30/100 2 c.s.	6 mm	(1), (3)
L_0 Filtre *Coprim Transco* FD 00409.				
L_1 12 spires 30/100 2 c.s. jointives,			6 mm	
L_2 2 × 8 spires, bifilaire, 30/100 2 c.s.,			6 mm	
L_3 5 spires 12/10 diamètre intérieur 10 mm (spires écartées), prise à 2,5 spires.				
L_4 70 spires 10/100 2 c.s. nid d'abeilles 66 × 35, 100 kΩ,			3 mm	L = 20 µH
L_5 85 spires 10/100 2 c.s. nid d'abeilles 65 × 35, 20 kΩ,			3 mm	L = 32 µH
L_6 40 spires 10/100 2 c.s. nid d'abeilles 66 × 35, 100 kΩ,			3 mm	L = 8 µH
L_7 8 spires 80/100 émaillé, jointives,			6 mm	
L_8 8 spires 80/100 émaillé, jointives,			6 mm	

Observations :

(1) Les bobinages sont exécutés dans le même sens.

(2) L'enroulement T1 est fractionné : 8 spires côté réglage et 9 à 3 mm de distance sous les spires de couplage du primaire.

(3) L'enroulement secondaire est fait à spires jointives sur toute la longueur du mandrin.

La figure 7 - 44 montre l'ensemble des bobinages F.I. vision sur leur plaque de circuit imprimé (*Oréga*).

7.5. —Le transformateur de sortie lignes, le déviateur et les transformateurs divers.

La figure 7 - 45 donne le schéma des circuits de balayage lignes et image (*Vidéon*). On voit sur ces schémas les bobinages intéressants.

Le transformateur de sortie lignes est en réalité un autotransformateur puisque tous les enroulements sont reliés en série.

Le noyau du circuit magnétique est en ferrite 3 C 2 ou 3 C 4. L'isolement est assuré par un mandrin en bakélite moulée. Les premiers enroulements

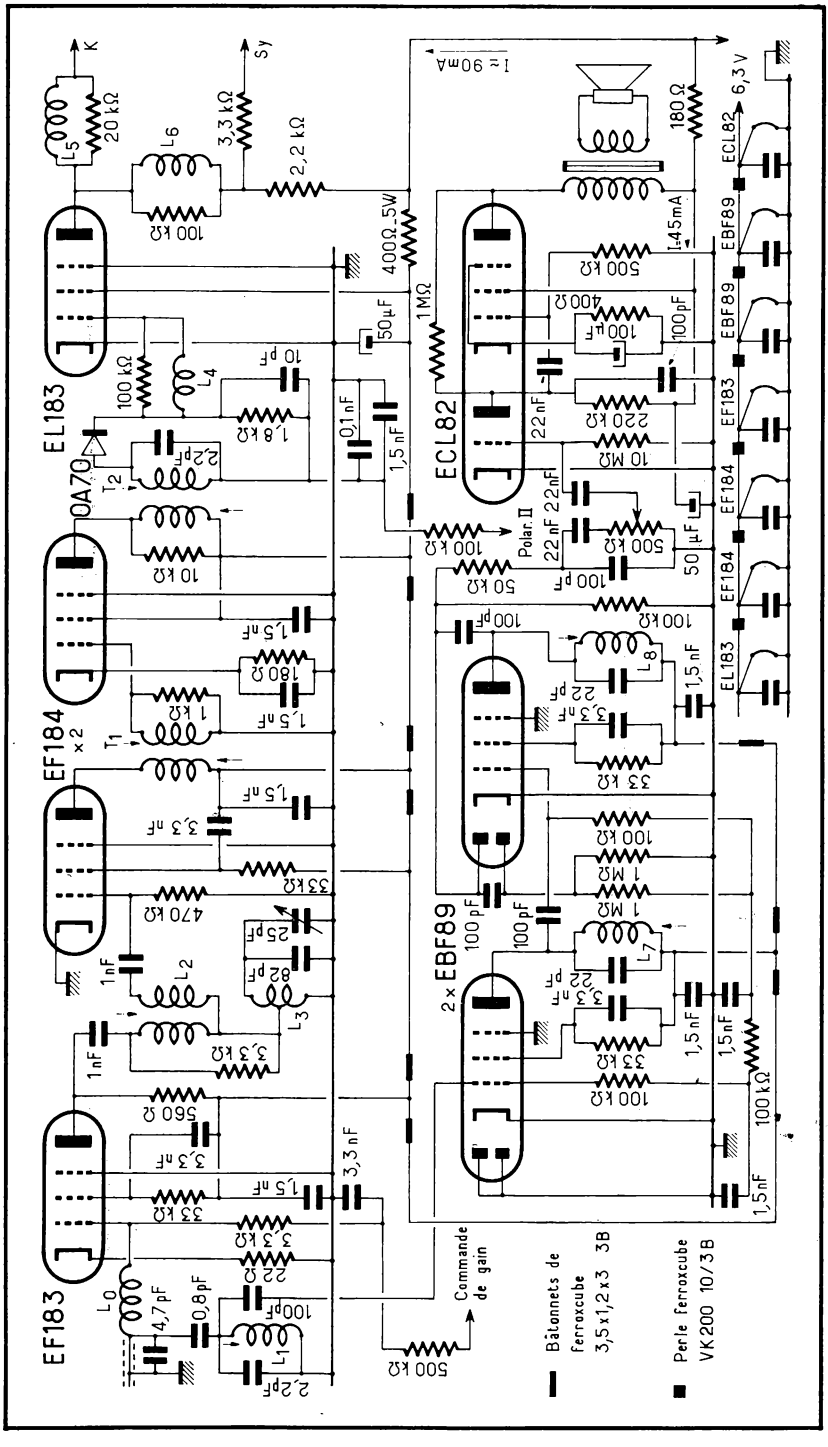


Fig. 7 - 43. — Amplificateur F.I. vision et son pour télévision (La Radiotechnique).

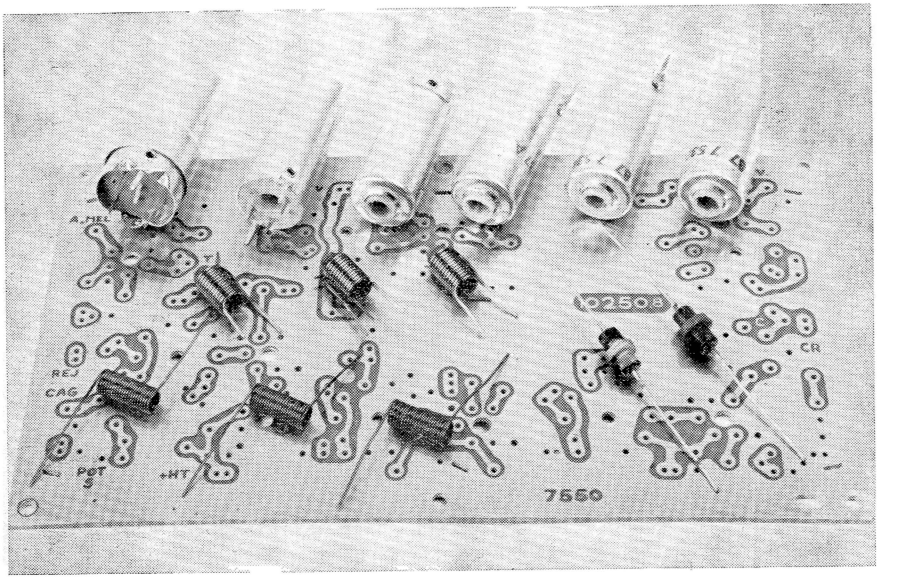


Fig. 7 - 44. — Jeu complet des bobinages F.I. télévision sur leur circuit imprimé (Oréga).

entre 3 et 9 sont en fil guipé nylon 0,2 mm environ. Le bobinage se fait en nid d'abeilles ou en spires rangées selon les constructeurs. Ces enroulements constituent le transformateur de sortie proprement dit et ils sont reliés aux bobines « lignes » du déviateur.

Le dernier enroulement est en nid d'abeilles étroit et haut en fil émaillé ou en fil émail-nylon. Les spires sont collées en cours de bobinage pour éviter la chute des spires extérieures. L'ensemble doit être parfaitement imprégné à l'araldite ou dans une cire à base de caoutchouc. En effet, entre les deux extrémités des enroulements on mesure des impulsions de 16 à 18 kV provenant du retour des lignes. Ces impulsions sont redressées par la valve EY 86 qui procure la « très haute tension » de l'anode accélératrice du tube cathodique.

On comprend qu'un bobinage donnant des tensions aussi élevées doit être sérieusement protégé. Il faut éviter la création d'effluves avec les pièces métalliques voisines qui doivent être écartées d'au moins 25 mm. Le capot et le support de la diode T.H.T. doivent être étudiés avec soin. Les matières plastiques utilisées doivent être auto-extinguibles pour arrêter le cheminement de la flamme même à haute température, si le bobinage venait à prendre feu.

Les pièces modernes sont très bien étudiées et donnent toute satisfaction à l'utilisateur tant du point de vue performances que du point de vue sécurité.

Le déviateur contient les bobines de balayage lignes et image perpendiculaires entre elles. Il est enfilé sur le col du tube cathodique pour assurer la déviation électromagnétique des électrons (fig. 7 - 46).

La carcasse est en plastique tenant au moins à 100° C. Elle doit être souple, incassable et avoir une bonne tenue diélectrique.

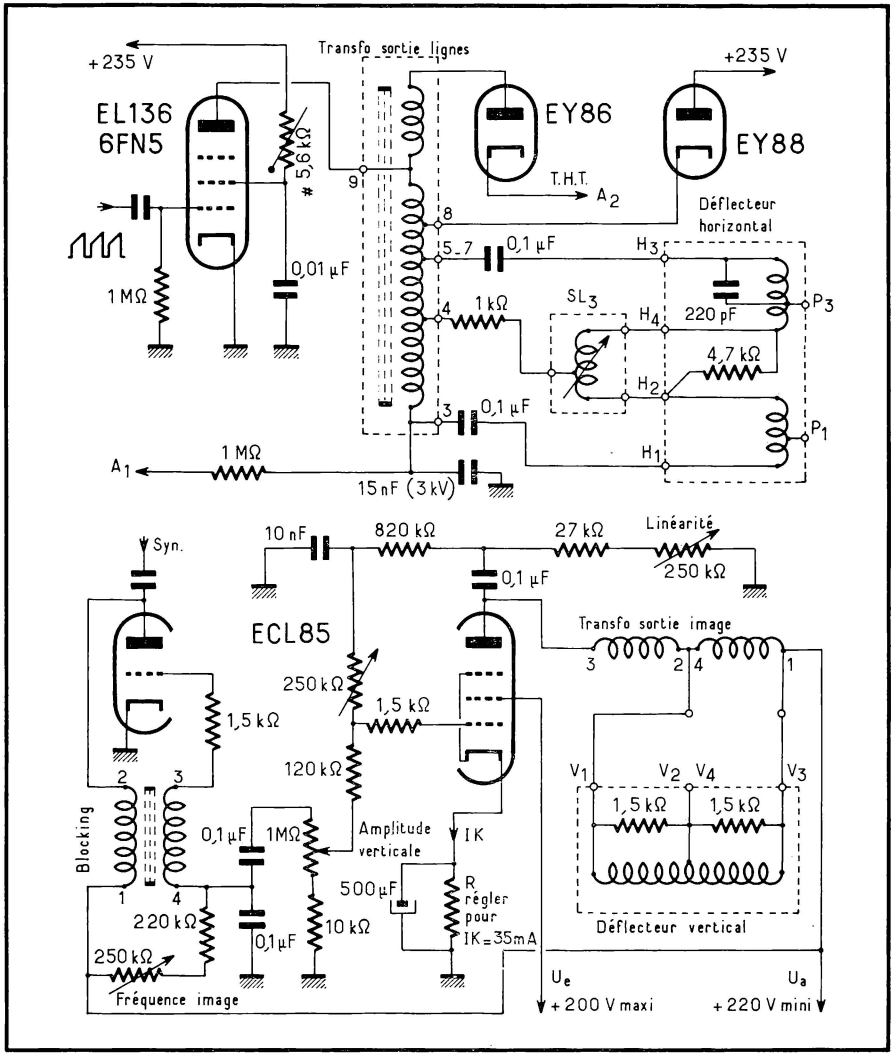


Fig. 7 - 45 (Ci-dessus). — Schéma des circuits de balayage lignes et image (Vidéon).

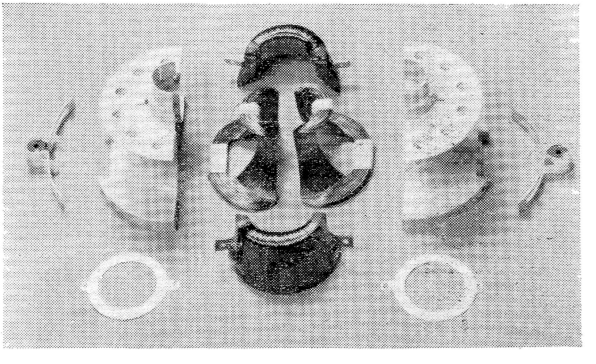


Fig. 7 - 46 (Ci-contre). — Déviateur éclaté montrant les différents éléments (Ducretet-Thomson).

Les bobines de déviation doivent avoir une forme spéciale tenant compte de l'évasement de la verrerie du tube.

Cette forme est difficile à calculer et elle doit être reproduite avec précision afin que le champ magnétique de déviation soit constant pour toutes les positions du flux électronique, c'est-à-dire pour que la géométrie de l'image soit parfaite, même dans les coins pour une déviation importante de 110°.

Ces enroulements sont bobinés dans un moule de forme appropriée avec du fil émaillé thermo-adhérent. On fait passer un courant dans la bobine qui porte le fil à environ 130° C et colle ainsi toutes les spires entre elles à la forme voulue. On laisse refroidir et on démoule les bobines. Pour avoir une bonne géométrie il faut que le fil soit d'un diamètre très régulier, afin d'avoir rigoureusement le même nombre de spires dans le même volume de la bobine.

Les bobines lignes et image doivent être bien isolées entre elles. Puis, elles sont serrées dans une bague de ferrite moulée (3 C 2 ou 3 C 4) augmentant l'inductance du circuit.

Les bobines lignes peuvent être montées en série ou en parallèle. Leur inductance en série est d'environ 13 mH et de 3 mH en parallèle.

L'inductance des bobines image est comprise entre 50 et 90 mH.

Le déviateur porte également un aimant de cadrage. La géométrie peut être retouchée au moyen de deux ou de quatre bâtonnets de ferrite placés de part et d'autre des bobines afin de modifier la répartition du champ magnétique.

Le transformateur de sortie image est placé entre le tube de sortie (ECL 85, fig. 7 - 45) et la bobine de déviation correspondante. Il a la forme d'un transformateur B.F. fixé par un étrier. Le circuit magnétique est en tôles au silicium à faibles pertes. L'isolement entre les enroulements et la masse est renforcé (4 500 V). L'inductance primaire est d'environ 15 H. Le rapport de transformation est de 12,5. Le transformateur est imprégné à la cire minérale.

Le transformateur de blocking image offre le même aspect que le transformateur de sortie image, sous un volume un peu moindre. L'inductance primaire et secondaire est un peu supérieure à 1 H. Le rapport de transformation est de 1/1. La fréquence de balayage est de 50 Hz.

La bobine de linéarité (S L 3) se place en série entre les bobines lignes. C'est une bobine en nid d'abeilles réglable par un bâtonnet de ferrite. Son inductance est de 0,5 mH pour les bobines à basse impédance et de 1,5 mH pour les bobines à haute impédance.

7.6. — Un téléviseur expérimental à transistors.

Voici, à titre d'exemple, le schéma complet d'un téléviseur à transistors (*Sesco*), avec ses caractéristiques.

Caractéristiques principales :

— Fonctionnement sur secteur 110/220 volts
ou sur batterie incorporée (autonomie 5 h.).
— Chargeur incorporé avec limiteur de charge.
— Alimentation régulée.
— Rotacteur 12 canaux bandes I et III.
— Poids approximatif : 13 kg.

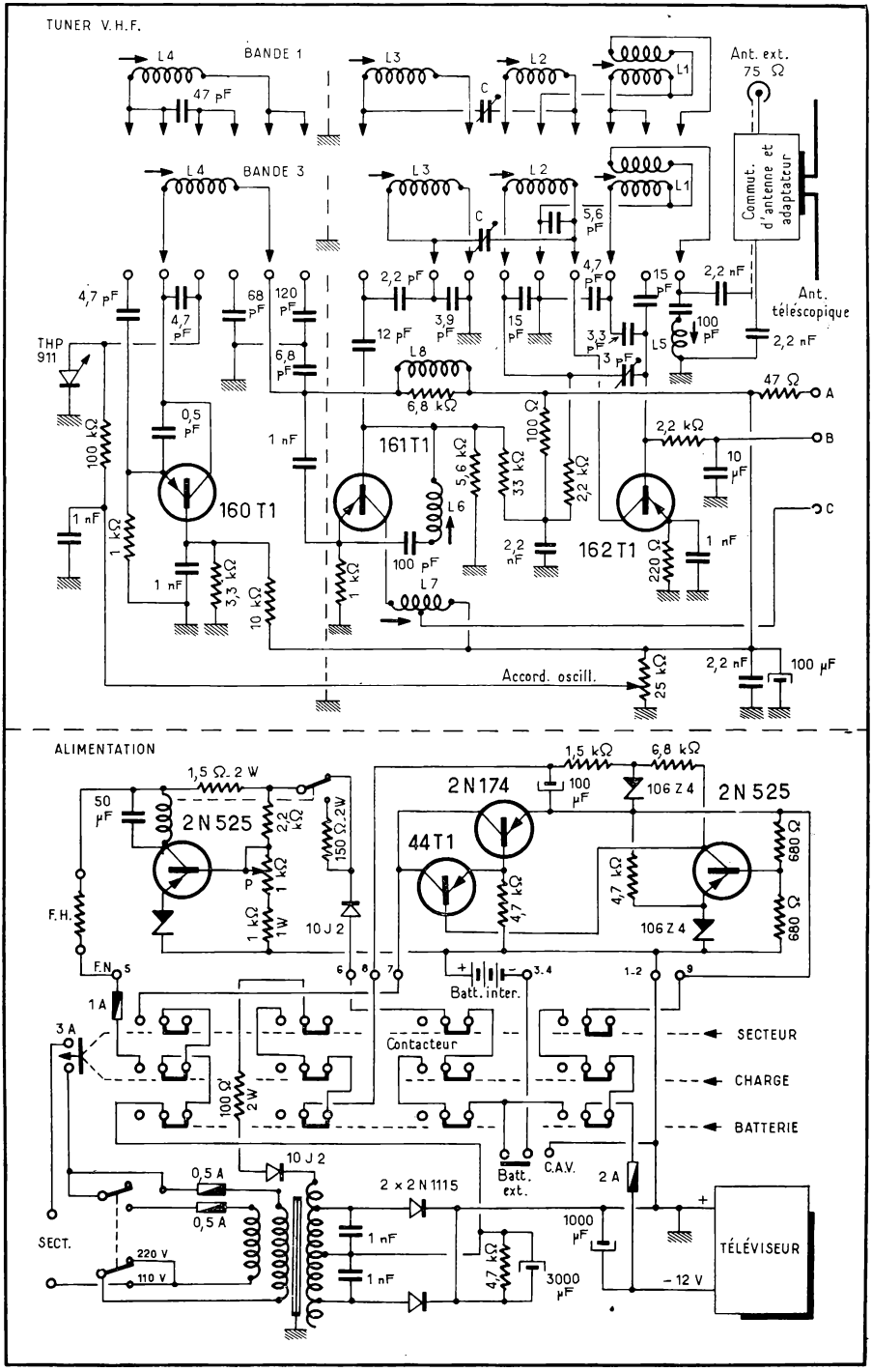
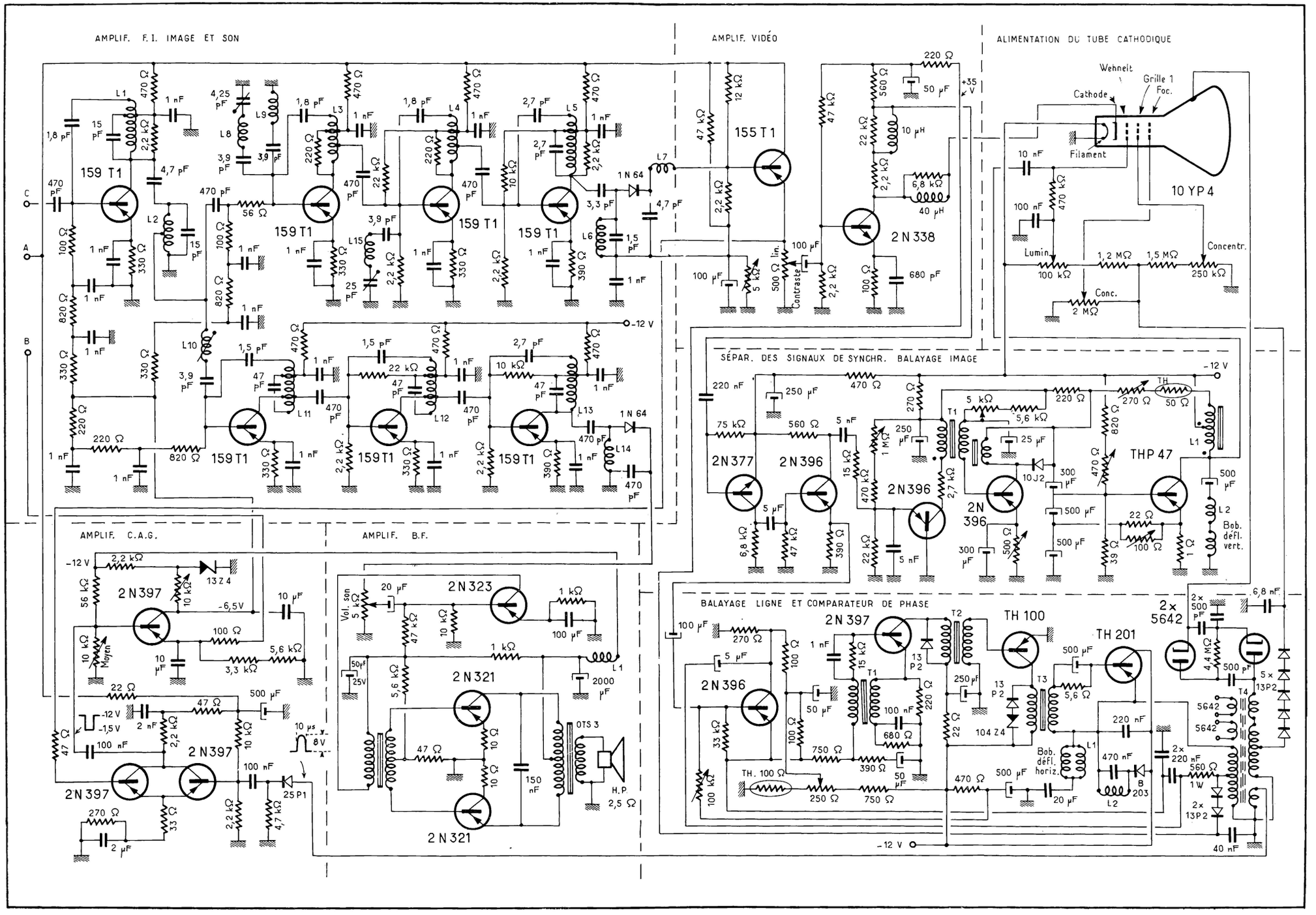


Fig. 7 - 47. — Schéma complet d'un téléviseur à transistors (Sesco) (1re partie).



Deuxième partie du téléviseur à transistors (Sesco).

— Sensibilité globale : tension H.F. d'entrée 25 µV.
tension vidéo sur la cathode du tube crête à crête : 25 volts.
— Gain tuner 23 dB.
— Gain F.I. avant détection 65 dB.
— Ampli vidéo : tension vidéo après détection 1,5 V crête.
— Gain ampli vidéo 25 (en tension).
— Tension de sortie max. 30 V crête à crête.
— Bande passante 10 MHz à ± 6 dB.
— Dynamique du C.A.G. 50 dB (20 dB VHF + 30 dB F.I.).
— Déformation de bande < ± 0,5 dB pour des tensions d'entrée comprises entre 10 mV et 25 µV.

BOBINAGES DU « TUNER » VHF.

Spécification des bobinages commutés : Canal 8 A Paris.

	Nbre de spires	Diamètre et qualité du fil		Bobinage	Réalisation
L	3	25/100	Thermo-soudable	Entre les spires de L_1	Sur mandrin *Orégа* incliné avec noyau d'alu — réglable
L_1	5	15/100	Thermo-soudable	Jointif	
L_2	3,5	45/100	»	»	»
L_3	3,25	»	»	»	»
L_4	2,25	»	»	»	»

Spécification des bobines fixes :

Nombre de spires		∅ et qualité du fil	Bobinage	Réalisation
L_5 - L_6	4,5	30/100 Thermo-soudable	Jointif	Bobiné sur mandrin *Lipa* type 4 MB 60 noyau de fer divisé
L_7	25,5 Prise à 6 spires	25/100 Thermo-soudable	Jointif	Bobiné dans un pot *Cofelec* FP H 50 12 × 9 avec noyau
L_8	15	30/100 Thermo-soudable	Jointif	Bobiné sur résistance 1 W de 6.800 Ω

SPÉCIFICATION DES BOBINAGES F.I. :

	Circuit oscillant nbre de spires	Prise liaison transistor	Enroult neutrod. nbre de spires	Mandrin Noyau	∅ du film	Self circuit osc. µH
L_1	10,5		5	*Lipa* 4 MB 60 Noyau fer	20/100	1
L_2	10,5	2,5		» »	»	0,6
L_3 - L_4	19	4,5	7,5	» »	»	3
L_5	14,5		8	» »	»	1,5
L_6	28,5			» »	15/100	5
L_8	17,5			*Lipa* TOC 18 air	75/100	
L_{10}	20			*Lipa* 4 MB 60 Noyau fer	20/100	
L_{11} - L_{12}	6	1,5	3,5	» »	30/100	0,4
L_{13}	6		3,5	» »	»	0,4
L_{14}	60			Bâtonnet *Isofer* F 2114 P 363	15/100	
L_{15}	13			*Lipa* TOC 18 air	100/100	

TRANSFORMATEURS ET INDUCTANCES POUR BALAYAGE IMAGE.

Transformateur T1 :

Sur circuit silicone DO 6 simple 2 C sans entrefer.

Enroulement L_1 : 300 sp. en fil cuivre émaillé ∅ 12/100 (relié au collecteur blocking) ; inductance 85 mH; résistance 17 Ω.

Enroulement L_2 : 100 sp. en fil cuivre émaillé ∅ 12/100 (relié à la base blocking) ; inductance 10 mH ; résistance 6 Ω.

Enroulement L_3 : 1 450 sp. en fil cuivre émaillé ∅ 12/100 (entretien) ; inductance 1,6 H ; résistance 110 Ω.

Inductance d'arrêt L_1 :

Sur circuit silicone FA 35 Q 38 *Isolectra* simple 2 C entrefer 15/100.

Enroulement L_1 : 450 sp. en fil cuivre émaillé ∅ 45/100 (relié au collecteur du THP 47) ; inductance 300 mH ; résistance 5,5 Ω.

Enroulement L_2 : 410 sp. en fil cuivre émaillé ∅ 25/100 (relié à la thermistance) ; inductance 250 mH ; résistance 21 Ω.

Sortie de L_1 reliée à l'entrée de L_2.

Bobines de déflexion L_2 :

Les deux enroulements de forme adaptée au tube sont montés en série et les valeurs globales sont :

— inductance : 70 mH,

— résistance : 30 Ω.

TRANSFORMATEURS ET INDUCTANCE POUR BALAYAGE LIGNE.

Transformateur T1 :

Sur circuit ferroxcube *Transco* 3 A1 circuit 34-10-12 sans entrefer.
Enroulement 1-2 : 50 sp. en fil cuivre ∅ 20/100 s/soie; inductance 8,5 mH.
Enroulement 3-4 : 16 sp. en fil cuivre ∅ 20/100 s/soie.

Transformateur T2 :

Sur circuit ferroxcube *Transco* 3 A1 circuit 34-10-12 sans entrefer.
Enroulement 1-2 : 12 sp. en fil cuivre ∅ 30/100 émaillé; inductance 400 µH.
Enroulement 3-4 : 9 sp. en fil cuivre ∅ 30/100 émaillé.

Transformateur T3 :

Sur circuit ferroxcube *Transco* 3 A1 circuit 34-10-12 sans entrefer.
Enroulements 1-2 et 3-4 : imbriqués, bobinage bifilaire.
Enroulement 1-2 : 85 sp. en fil cuivre ∅ 25/100 émaillé; inductance 23 mH.
Enroulement 3-4 : 85 sp. en fil cuivre ∅ 50/100 émaillé.

Transformateur T4 :

Enroulement 1- 2 :	20	spires	nid d'abeilles	fil cuivre	∅ 20/100	s/soie.
2- 3 :	20	»	»	»	»	»
4- 5 :	4	»	»	»	»	»
6- 7 :	280	»	»	»	»	»
7- 8 :	850	»	»	»	»	»
9-10 :	1000	»	»	»	∅ 10/100	»
11-12 / 13-14	2 sp. en fil THT TV.					

Bobines de déflexion horizontale :

Les deux enroulements sont en parallèle. Forme standard adaptée au tube. Chaque bobine est constituée de 11 fils de cuivre émaillés de 30/100 mis en parallèle.

8. — LES BOBINAGES PROFESSIONNELS.

Les bobinages pour le matériel professionnel ne sont pas très différents des bobinages grand public. Les efforts ont surtout porté sur la protection et la stabilité des enroulements.

— *Pour les fréquences les plus basses*, les filtres sont bobinés dans des pots en ferrite professionnels qui ont été étudiés. Il suffit de les imprégner sous vide à la cire microcristalline minérale pour les protéger et de leur faire subir plusieurs cycles thermiques pour stabiliser leurs caractéristiques. Selon la fréquence on choisit soit du fil émail plein, soit du fil divisé. Il existe des câbles groupant jusqu'à 400 brins 0,03 ou 0,04 mm. Avec un tel fil on obtient des coefficients de surtension remarquables, mais son prix est très élevé.

— *Pour les fréquences supérieures*, les mandrins classiques font leur apparition. Le réglage est obtenu par un bâtonnet de fer H.F. ou de ferrite fixé à une vis permettant un réglage précis et stable. Cette vis peut ensuite être bloquée. La matière constituant le support est soigneusement sélectionnée, tel le *téflon*, qui est remarquable, mais trop coûteux pour le matériel grand public.

La disposition des sorties et des fixations doit être étudiée avec soin, afin que l'ensemble offre une grande robustesse aux chocs et aux vibrations sous tous les climats. Il ne faut pas que l'humidité puisse altérer le facteur de surtension, ni que les micro-organismes puissent proliférer à la surface. Les produits fongicides doivent être choisis pour ne pas attaquer le bobinage. La figure 7 - 48 montre quelques bobinages professionnels *C.S.F.* réalisés en tenant compte de ces impératifs.

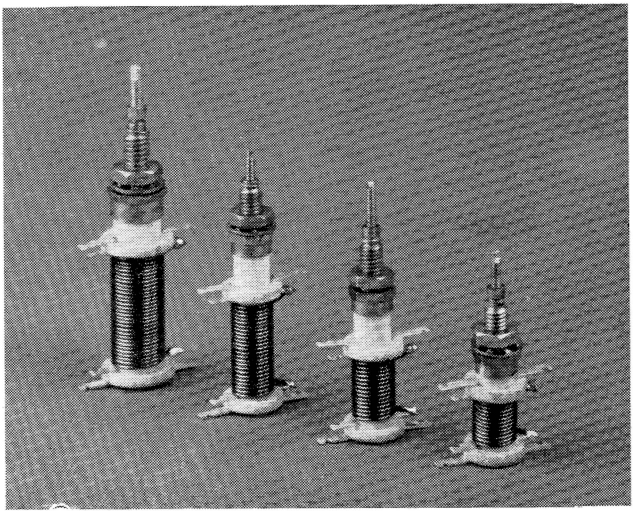


Fig. 7 - 48. — Bobinages professionnels (C.S.F.).

Certains bobinages sont entièrement enrobés dans des produits tels que l'araldite qui offrent une protection parfaite mais qui ne peuvent pas être employés dans tous les cas.

D'autres sont enfermés dans des tubes de verre dans lesquels on fait le vide et qui sont hermétiquement scellés.

Les récepteurs professionnels ont leurs bobinages contenus dans des tiroirs ou dans des barillets. Ce sont les bobinages qui viennent se placer devant les contacts fixes. Les connexions sont plus courtes, il n'y a pas de « bouts morts » et le blindage entre les circuits est beaucoup plus rigoureux.

Cette question de blindage est très importante. Les bobinages professionnels doivent être entourés par des blindages épais en cuivre ou en aluminium largement dimensionnés. Ainsi, la protection contre les champs magnétiques extérieurs est bonne et l'amortissement du bobinage est extrêmement faible.

— *Pour les fréquences élevées,* les bobinages deviennent très simples. Ils comportent quelques spires de fil argenté, doré ou émaillé selon les cas, bobinées sur un support en céramique, en téflon, en quartz ou en verre spécial. Ils peuvent être munis d'un réglage par fer H.F. ou par ferrite. La protection de ces bobines est relativement simple surtout pour le fil doré qui est vraiment inattaquable.

Ce sont beaucoup plus les contacteurs qui occasionnent des difficultés aux fréquences élevées.

— *Pour les circuits de puissance,* les bobinages sont étudiés en fonction de la fréquence du circuit et de la nature du signal.

Les bobines pour les étages de faible puissance sont constituées par du fil argenté bobiné sur quelques barrettes en stéatite ou en téflon assurant la rigidité des spires. Leur réglage s'effectue, soit à l'aide d'une spire en court-circuit que l'on approche plus ou moins de l'enroulement (fig. 7 - 49), soit à l'aide d'un contact glissant qui élimine une ou plusieurs spires.

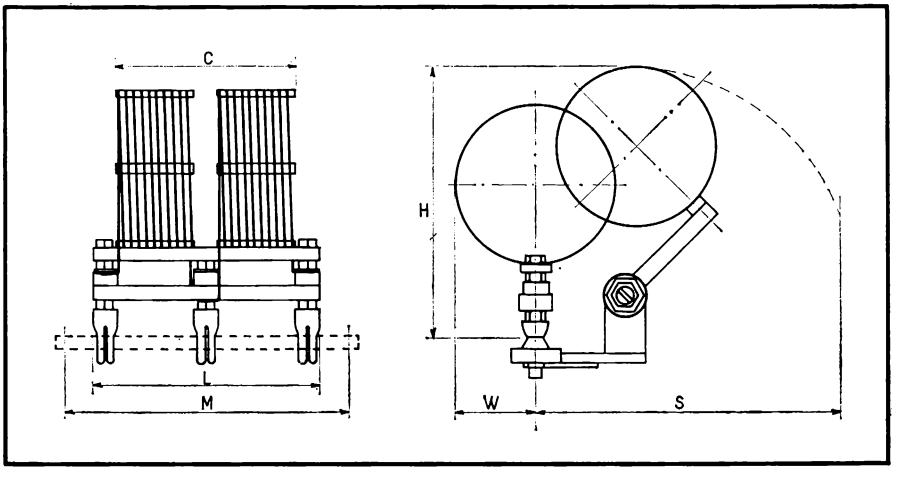


Fig. 7 - 49. — Bobinage pour émetteur jusqu'à 1 kW. Entre les deux enroulements fixes se déplace une spire en court-circuit de réglage.

Les bobinages pour les émetteurs de grande puissance sont construits en tube de cuivre étamé ou argenté de diamètre convenable. Le diamètre du tube est fonction de la puissance H.F. à dissiper dans l'étage. Ces bobinages sont maintenus par des barrettes isolantes à faibles pertes H.F. (céramique, quartz, *téflon*). Ces supports ont un volume réduit, car on sait que l'air est le meilleur des isolants.

Ces bobinages sont refroidis, soit par une circulation d'air forcé, soit par l'eau nécessaire au refroidissement du tube associé à cet enroulement. Le circuit « *Vapodyne Thomson* » évite cette complication du bobinage. En effet, la circulation de l'eau est indépendante du circuit électrique.

TABLE DES MATIÈRES

I. — LES NORMES, LES UNITÉS ET LES SYMBOLES.

1. **Les organismes de normalisation** 7
— La Fédération Nationale des Industries Electroniques 7
— L'Union Technique de l'Electricité 8
— Le Comité de coordination des télécommunications 8
— Le laboratoire central des industries électriques 9
— Les organismes étrangers 9
2. **Les unités** 9
— Le système international 9
— Multiples et sous-multiples 12
3. **Principes de l'écriture des nombres, des unités et des grandeurs** 12
— Ecriture des nombres 12
— Formation des symboles d'unités 12
— Formation des noms d'unité 13
— Majuscules 14
— Ecriture des grandeurs 14
4. **Symboles graphiques concernant les télécommunications** 14
5. **Tables de conversion entre les unités métriques et les unités anglo-saxonnes** 15

II. — LES RÉSISTANCES FIXES.

1. **Généralités** 16
— Les définitions 16
— Les différents types de résistance 20
— Le marquage des résistances 22
— La normalisation des valeurs .. 22
— Les essais normalisés 23
2. **Les résistances bobinées** 24
— Le fil résistant 24
— Les résistances bobinées de puissance 25
— Les résistances bobinées de précision 28
3. **Les résistances non bobinées** .. 30
— La fabrication des résistances à couche de carbone 35
— La fabrication des résistances à couche métallique 37
— Les caractéristiques des résistances à couche 40
— Les différents modèles fabriqués 40
— La fabrication des résistances agglomérées 42
— Les caractéristiques des résistances agglomérées 43
— Les différents modèles fabriqués 50

III. — LES RÉSISTANCES VARIABLES.

1. **Les résistances variables bobinées** 51
— Les résistances variables à faible dissipation 53
— Les résistances variables à forte dissipation 55
— Les résistances variables bobinées de précision 60
2. **Les résistances variables non bobinées** 64
— Les résistances variables à couche de carbone 64
— Les résistances variables à piste moulée 68
— Les résistances variables à couche métallique ou à plastique conducteur 72

IV. — LES CONDENSATEURS FIXES.

1. **Généralités** 73
— La capacité 73
— Le condensateur en continu 74
— Le condensateur en alternatif .. 75
— Les caractéristiques théoriques d'un condensateur 76
— La constante diélectrique 77
— La résistance d'isolement 77
— L'absorption diélectrique 78
— Le courant de fuite et la constante de temps 78
— La rigidité diélectrique 79
— L'influence de la fréquence sur le comportement des diélectriques 79
— Les spécifications officielles sur les condensateurs 79
— Les différents types de condensateurs 79
2. **Les condensateurs au papier** .. 81
— Le papier 81
— La fabrication 82
— Les caractéristiques principales .. 85
— Les différents modèles 86
3. **Les condensateurs au papier métallisé** 87
— Le papier spécial 88
— La métallisation du papier 88
— La finition du papier métallisé .. 89
— La fabrication des condensateurs 89
— Les caractéristiques principales .. 91
— Les différents modèles 93
4. **Les condensateurs au film plastique et au film plastique métallisé** 94
— Les films plastiques 94
— La fabrication 95
— La fabrication des condensateurs à film plastique métallisé 97
— Les caractéristiques 97
— Les différents modèles 98
5. **Les condensateurs au mica** ... 99
— Le mica 99
— La fabrication 99
— Les caractéristiques 101
— Les différents modèles 104
6. **Les condensateurs au verre** ... 105
— Le verre 105
— La fabrication 105
— Les caractéristiques 107
— Les différents modèles 108

7. **Les condensateurs céramique** .. 108
— Les céramiques pour condensateur 108
— La fabrication 109
— Les caractéristiques des condensateurs du groupe I 110
— Les différents modèles de condensateurs du groupe I 111
— Les caractéristiques des condensateurs du groupe II 116
— Les différents modèles 117
8. **Les condensateurs électrolytiques à l'aluminium** 118
— La fabrication 119
— Les caractéristiques 122
— Les différents modèles 124
9. **Les condensateurs électrolytiques au tantale** 125
— Le tantale 125
— La fabrication 126
— Les caractéristiques 127
— Les différents modèles 128

V. — LES CONDENSATEURS VARIABLES.

1. **Les condensateurs variables à air** 130
— Les condensateurs variables grand public 131
— Les condensateurs variables professionnels 137
2. **Les condensateurs ajustables** .. 137
— Les condensateurs ajustables cylindriques à air 137
— Les condensateurs à lames, à diélectrique air 140
— Les condensateurs ajustables à disques en diélectrique céramique .. 140
— Les condensateurs ajustables cylindriques à diélectrique solide ... 141
— Les condensateurs ajustables au mica 142

VI. — LES BOBINAGES POUR LES CIRCUITS D'ALIMENTATION ET DE BASSE FRÉQUENCE.

1. **Généralités** 143
— L'électromagnétisme 143
— La bobine de self-induction en alternatif 146
— Le circuit oscillant série 147
— Le circuit oscillant parallèle 149
2. **Les tôles magnétiques** 152
— Les tôles ordinaires au silicium .. 153
— Les tôles au silicium orientées .. 156
— Les alliages au nickel 160
3. **Le fil de cuivre** 164
— Le fil guipé 164
— Le fil émaillé 165
4. **Les isolants** 167
— Isolement entre couches 167
— Isolement des bobinages entre eux et par rapport à la masse 168
— L'imprégnation des bobinages .. 169
— La protection au trempé 170
5. **Les machines à bobiner** 171
— Les tourets à main 171
— Les tourets automatiques 172
— Les tourets automatiques multiples 172
6. **Le transformateur d'alimentation** 173
— Le calcul du transformateur d'alimentation 174
— La réalisation des transformateurs d'alimentation 178
— Les transformateurs potentiométriques 179
— Les régulateurs de tension à fer saturé 180
7. **L'inductance de filtre** 182
8. **Le transformateur basse fréquence** 185
— Les transformateurs de tension . 189
— Les transformateurs de puissance 192
— Les différents transformateurs B. F. catalogués 198

VII. — LES BOBINAGES POUR LES CIRCUITS A HAUTE FRÉQUENCE.

1. **Généralités** 199
2. **Le fil** 199
3. **Les supports** 202
— Les supports non magnétiques .. 202
— Les supports magnétiques métalliques 203
— Les supports magnétiques non métalliques : les ferrites 208
4. **Le bobinage** 217
— La machine à bobiner 217
— L'imprégnation des bobines 219
5. **Les bobinages pour récepteurs grand public à modulation d'amplitude** 220
— L'étage d'entrée 221
— L'étage oscillateur 223
— Les commutations 226
— Les schémas pour la réception de plusieurs gammes 227
— Le réglage de la commande unique 231
— Les étages à fréquence intermédiaire 232
6. **Les bobinages pour récepteurs grand public à modulation de fréquence** 236
— Les schémas à tubes 240
— Les schémas à transistors 243
7. **Les bobinages pour la télévision** 243
— Le rotacteur pour les bandes I et III 245
— Le tuner pour les bandes IV et V 246
— L'amplificateur F.I. 248
— Le transformateur de sortie lignes, le déviateur et les transformateurs divers 250
— Un téléviseur expérimental à transistors 254
8. **Les bobinages professionnels** ... 260

LES MEILLEURS LIVRES DE RADIO

CARACTÉRISTIQUES UNIVERSELLES DES TRANSISTORS. — Courbes et caractéristiques détaillées, format 21-27.

Types BF (faible puissance) 40 p. ..... **5,40 F**
Types Puissance 40 p. ..... **5,40 F**
Types HF, 36 p. ..... **6,60 F**

CARACTÉRISTIQUES OFFICIELLES DES TUBES B.F. — Courbes et caractéristiques détaillées.
96 pages, format 21-27 ..... **15 F**

CARACTÉRISTIQUES OFFICIELLES DES TUBES H.F. — Courbes et caractéristiques détaillées.
96 pages, format 21-27 ..... **15 F**

CARACTÉRISTIQUES OFFICIELLES DES TUBES T.V. — Courbes et caractéristiques détaillées.
64 pages, format 21-27 ..... **12 F**

CIRCUITS ELECTRONIQUES, par **J.-P. Œhmichen.** — La solution de tous les problèmes électroniques. Etude des signaux : production, transformation, mesure et utilisation
276 pages, format 16-24 ..... **13,50 F**

EMPLOI RATIONNEL DES TRANSISTORS, par **J.-P. Œhmichen** — Livre de base traitant de toutes les applications des semiconducteurs dans tous les secteurs de l'électronique.
376 pages, format 16-24 ..... **30 F**

LE TRANSISTOR ?... MAIS C'EST TRÈS SIMPLE, par **E. Aisberg.** — La constitution d'un transistor, ses caractéristiques, son utilisation dans les récepteurs et montages électroniques.
148 pages, format 18-23 ..... **12 F**

L'OSCILLOSCOPE AU TRAVAIL, par **F. Haas** — Méthodes de mesures et interprétation de plus de 300 oscillogrammes relevés par l'auteur.
224 pages, format 16-24 ..... **18 F**

PRATIQUE ÉLECTRONIQUE, par **J.-P. Œhmichen.** — Conception, calcul et réalisation des ensembles électroniques.
304 pages, format 16-24 ..... **13,50 F**

RADIORÉCEPTEURS A GALÈNE ET A TRANSISTORS, par **Ch. Guilbert.** — Données pratiques pour la réalisation des récepteurs à galène et à un ou deux transistors.
24 pages, format 21-27 ..... **4,80 F**

SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS B.F. à TRANSISTORS, par **R. Besson.** — Amplificateurs pour radio, phono, prothèse auditive, préamplificateurs, interphones, etc...
48 pages, format 21-27 ..... **8,40 F**

NOUVEAUX SCHÉMAS D'AMPLIFICATEURS B. F. A LAMPES, par **R. Besson.** — Nouvelle édition refondue. Une gamme complète d'amplificateurs à petite et grande puissance.
48 pages, format 21-27 ..... **6 F**

TECHNIQUE DE L'OSCILLOSCOPE, par **F. Haas.** — Principe et constitution du tube cathodique ; étude des circuits d'amplification et de balayage ; utilisation.
136 pages, format 16-24 ..... **9,60 F**

TECHNIQUE ET APPLICATION DES TRANSISTORS, par **H. Schreiber.** — Propriétés, fonctionnement, mesures et utilisation des divers types de semi-conducteurs. Cinquième édition refondue.
336 pages, format 16-24 ..... **21 F**

TECHNOLOGIE DES CIRCUITS IMPRIMÉS, par **J.-P. Œhmichen.** — Un ouvrage très documenté imprimé en plusieurs couleurs ; étude des matériaux et détails technologiques concernant aussi bien les prototypes que les fabrications en petites ou grandes séries.
224 pages, format 16-24 ..... **27 F**

TOUTE LA STÉRÉOPHONIE, par **R. Besson.** — Principe ; appareils stéréophoniques de prise de son et de reproduction ; installations, schémas.
168 pages, format 16-24 ..... **12 F**

TRAITEMENT ÉLECTRONIQUE DE L'INFORMATION, par **L.-I. Gutemakher.** — Traduit du russe, cet ouvrage analyse les différentes méthodes de mémoires et de transfert d'informations dans les calculateurs numériques.
152 pages, format 16-24 ..... **18 F**

TRANSFORMATEURS RADIO, par **C. Guilbert.** — Calcul et réalisation des transformateurs d'alimentation, des transformateurs B. F. et des inductances de filtrage. Les relais et leurs calculs.
160 pages, format 16-24 ..... **13,50 F**

VOTRE RÈGLE A CALCUL, par **Ch. Guilbert.** — Il ne faut pas se borner à faire de simples règles de 3 avec une règle à calcul. L'auteur expose tout le parti que l'on peut retirer de cet instrument quand on le connaît parfaitement.
72 pages, format 21-27 ..... **9 F**

(Ajouter 10 % pour frais d'envoi)

SOCIÉTÉ DES ÉDITIONS RADIO

9, Rue Jacob - PARIS-VI[e] C. P. Paris 1164-34

Dans le domaine particulier de l'Electronique, la technologie des composants ne saurait en aucune manière être ignorée de ceux qui les incorporent dans les ensembles, pas plus que ne peuvent la méconnaître ceux qui fabriquent ces composants.

Or, parmi l'immense variété des composants, comment s'y reconnaître ? Comment opérer un choix rationnel ? Comment employer au mieux les éléments choisis ?

A ces questions on trouvera des réponses utiles dans ce livre qui passe en revue l'ensemble des éléments passifs entrant dans la composition des circuits : les résistances, les condensateurs et les bobinages.

Si l'on sait convenablement déterminer les caractéristiques de ces composants, si on les associe d'une manière appropriée aux éléments actifs que sont les tubes et les semiconducteurs, on possède alors la parfaite maîtrise de toute l'électronique.

Ce livre ouvre le chemin d'une pareille maîtrise. D'autant plus que l'auteur, qui exerce son activité dans l'industrie et dans l'enseignement, a su donner un concentré de son expérience industrielle, rendu aisément assimilable grace à un exposé clair et méthodique inspiré par la grande habitude de l'enseignement.